

Bakalářská práce

# **Příprava vrstvené oceli**

**Preparation of composite steel**

Jméno autora: Daniel Pasečný

Rok odevzdání: 2021

## **Poděkování**

Chtěl bych tímto poděkovat Ing. Rostislavovi Kawulokovi, Ph.D. a Ing. Stanislavovi Ruzzovi, Ph.D. za jejich cenné rady a připomínky, poskytnuté materiály, zajištění praktické části a v neposlední řadě trpělivost a vstřícnost při konzultacích mé závěrečné práce. Chtěl bych také poděkovat mé rodině a přátelům za jejich podporu.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá problematikou přípravy vícevrstvé oceli pomocí válcování za tepla. Byly zkoumány různé možnosti a realizace přípravy vícevrstvého ocelového kompozitu z austenitické antikorozi oceli AISI 304 a nástrojové vysokouhlíkové oceli AISI D2. Práce popisuje přípravu paketů z těchto ocelí o vrstvách 5, 15 a 45, experimentální zařízení na kterém byla praktická část realizována, následnou dokumentaci a hodnocení metalografických snímků a zkoušek tvrdosti, které byly prováděny na vyhotovených vzorcích. Výsledkem práce jsou zjištěné a zaznamenané vlastnosti struktury a zrna po válcování, změna tloušťek jednotlivých vrstev ve vzorcích a dosažená maximální naměřená tvrdost jednotlivých vzorků a její srovnání s konvenční ocelí.

## **Klíčová slova**

nástrojová ocel, antikorozi ocel, kompozitní ocel, damašková ocel, válcování, metalografie, zkoušky tvrdosti

## **Abstract**

This work deals with the issue of preparation of multilayer steel by hot rolling. Various possibilities and realizations of preparation of multilayer steel composite from austenitic anticorrosion steel AISI 304 and tool high carbon steel AISI D2 were investigated. The work describes the preparation of packages from these steels with layers 5, 15 and 45, experimental equipment on which the practical part was implemented, subsequent documentation and evaluation of metallographic images and hardness test, which were performed on the samples. The resulting work is processed and the properties of structures and grains after rolling, the change in the thickness of individual layers of the samples and the achieved maximum measured hardness of individual samples and its comparison with mono-steel samples are recorded.

## **Key words**

tool steel, anticorrosive steel, composite steel, damascus steel, rolling, metallography, hardness test

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Co je to vrstvená ocel .....	2
2.1	Mýty o damaškové oceli .....	3
2.1.1	Damašková ocel nepochází z damašku .....	3
2.1.2	Damašková ocel nemá nepřekonatelnou kvalitu .....	3
2.1.3	K výrobě není potřeba magie .....	3
3	Druhy damaškové oceli .....	4
3.1	Svářkový damašek .....	5
3.2	Časté chyby při výrobě svářkového damašku.....	6
3.3	Materiály vhodné pro výrobu svářkového damašku.....	7
3.3.1	Obsah uhlíku .....	7
3.3.2	Difúze uhlíku.....	8
3.3.3	Mangan.....	9
3.3.4	Níkl.....	9
3.3.5	Chrom.....	9
3.3.6	Běžné oceli .....	9
3.3.7	Vhodné kombinace materiálu pro svářkový damašek.....	12
3.4	Damašek vyrobený technologií práškové metalurgie .....	13
3.5	Litý damašek (Wootz, Bulat).....	14
3.5.1	Výroba litého damašku.....	15
3.6	Podobné kompozitní materiály .....	15
3.6.1	Timaskus .....	15
3.6.2	Mokume Gane .....	16
3.6.3	Dambraskus .....	17
3.6.4	Falešný damašek .....	17
4	Mechanické vlastnosti kompozitních kovových materiálů .....	18

4.1	Zvyšování rázové houževnatosti díky použití kompozitní oceli.....	20
4.2	Tahové vlastnosti ocelových kompozitů.....	22
4.3	Zvyšování odolnosti proti šíření trhlin pomocí nízkotlakého lisování .....	23
5	Cíle práce.....	24
6	Experimentální část .....	25
6.1	Předválcovací vratná stolice .....	25
6.2	Příprava materiálu .....	26
6.3	Válcování .....	28
6.4	Metalografie.....	34
6.5	Měření tloušťky vrstev.....	37
6.6	Měření tvrdosti.....	39
7	Závěr.....	42
	Seznam použité literatury.....	43

---

## 1 Úvod

Na světě existuje mnoho způsobů a technologií, jak připravovat či vyrábět kovové materiály různých druhů a složení. V této práci se věnuji především přípravě vícevrstevných kompozitních ocelí právě z toho důvodu, že je to téma, které i přes svou bohatou a dlouhou historii je stále aktuální a snad i díky svému širokému rozsahu není ještě zcela detailně prozkoumáno. Vícevrstvé kovy nám oproti konvenčním kovovým materiálům dokážou nabídnout odlišné, v některých případech i lepší mechanické vlastnosti v daných aplikacích. Není to však úplně pravidlem, protože s dnešními moderními technologiemi výroby čistých kovů a jejich slitin, zejména pak oceli, je kvalita a především ekonomičnost výroby těchto kompozitů mnohdy překonána. Nicméně v historii, kdy nebyly k dispozici moderní hutnické zařízení a technologie, se lidé snažili dosáhnout dobrých mechanických vlastností pomocí kombinace různých materiálů. Největší rozmach v minulosti zaznamenaly vícevrstvé kovy právě díky potřebě výroby kvalitních řezných nástrojů a zbraní. Konvenční ocelové materiály, které kováři znali, nebyly pro výrobu například mečů a brnění dostatečné, a tak se začalo experimentovat s jejich kombinováním. I přesto, že v dnešní době dokážeme takto kvalitní zbraně vyrobit z monoocelového materiálu, stále jsou zbraně či různé šperky vyráběné z vícevrstvé oceli vyhledávány, díky jejich charakteristickým vzorům, které materiálu přidávají na vizuální hodnotě.

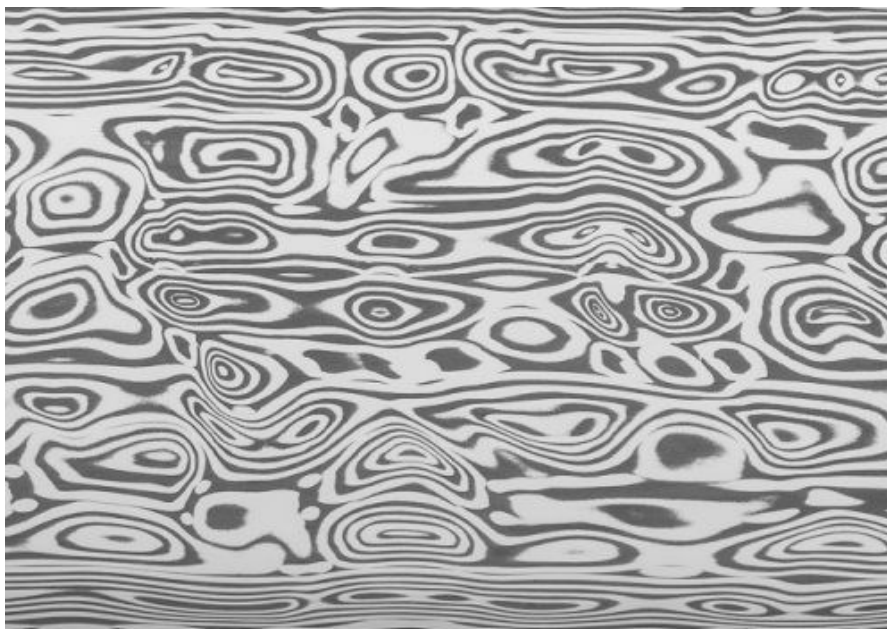
Teoretická část této práce je zaměřena na popis jednotlivých druhů kompozitních ocelových a nekovových materiálů, dále také na jejich vznik, historii, využití a výrobu. Praktická část se zabývá přípravou vícevrstvé oceli pomocí válcování na vratné duo stolici, jež je součástí polospojité laboratorní válcovny tyčí na FMT, VŠB – TU Ostrava. Experiment byl realizován na austenitické antikorozi oceli AISI 304 a nástrojové oceli AISI D2 s cílem o dosažení jejich dostatečně kvalitního spojení v počtu 5, 15 a 45 vrstev. Spojené kompozitní pakety či sendviče byly následně podrobeny metalografickým analýzám zaměřenými na detaily spojení jednotlivých vrstev, měřením tloušťky vrstev a hodnocením tvrdosti.

---

## 2 Co je to vrstvená ocel

Vrstvená ocel, kompozitní ocel, nebo také velice známá ocel damašková je druh materiálu, s více či méně pravidelnou vnitřní strukturou, která je ale nehomogenní. Sestává se ze střídajících se vrstev nejméně dvou druhů ocelí (může být i více). Pro kompozitní materiály je charakteristické, že se vyrábějí postupy mechanického mísení nebo spojování jednotlivých složek. Tím se liší například od slitin. U slitin jednotlivé fáze vznikají fázovými přeměnami při tuhnutí a jsou tedy blízko termodynamické rovnováže. Kompozitní materiály jsou charakteristické svým takzvaným synergismem, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Existence synergismu je pro nás velmi přínosná, protože díky němu máme možnosti objevovat nové materiály s různými kvalitami [1,2].

Jak již bylo zmíněno výše, struktura je nehomogenní. To znamená, že má nerovnoměrné rozložení obsažených legujících prvků (např. Mn, Ni, Cr, V). Damašková ocel je materiál kompaktní, vrstvy jsou navzájem pevně spojeny. Zóny různého složení se také liší svým korozním chováním v závislosti na obsahu legujících prvků. Kyselinovým leptáním povrchů damaškové oceli nám vyniká struktura a esteticky zajímavé reliéfy, jako například na **obr. 1**, které jsou pro tento druh materiálu charakteristické [1,3,4].



**Obr. 1** Vzor damaškové oceli typu Damasteel [3]

---

## 2.1 Mýty o damaškové oceli

Kolem damaškové oceli a jejího charakteristického vzhledu a vlastností koluje spousta legend a polopравd. Důvodem je hlavně složitost tématu a někdy také nejasné zdroje informací.

### 2.1.1 Damašková ocel nepochází z damašku

Damašek, jako hlavní město Sýrie a nejstarší trvale osídlené město na světě opravdu není místem zrodu damaškové oceli. Po mnoho století bylo město ústředním překladištěm různého zboží všeho druhu. Podle historiků a jejich předpokladů název „damašková ocel“ vznikl z toho důvodu, že se zde obchodovalo ve velkém množství také se zbraněmi vyrobenými z tohoto materiálu. Damašková ocel byla zřejmě nejprve vyráběna v Indii, odkud se následně výrobky rozšířily do celého světa a tuto technologii zpracování oceli se snažily napodobit snad všechny země světa, které byly schopné zpracovávat ocel a železo [1,4].

### 2.1.2 Damašková ocel nemá nepřekonatelnou kvalitu

Damašková ocel je u většiny lidí pověstná svou kvalitou, avšak vysoká kvalita není úplně ten správný pojem, jak charakterizovat tento materiál dnes. V dnešní době moderních metalurgických postupů, přesnosti a čistoty výroby překoná moderní ocel svými vlastnostmi ocel damaškovou. V současnosti jde již ve většině případů spíše o aspekty estetické. Dřív tomu ovšem tak nebylo, v dřívějších dobách byla výroba vysoce kvalitní oceli velmi obtížná, až do příchodu industrializace, což znamená, že brnění, či zbraně vojáků byly vyrobeny z průměrného až nekvalitního materiálu. Zbraně a brnění vyrobené z damaškové oceli byly naopak kvalitní, avšak v době rozvoje a nepochopené technologie velmi drahé, a tak si je nemohl dovolit každý. Značné výrobní úsilí, zkušenosti, know-how a zejména vysoký podíl manuální práce v tomto procesu má za následek odpovídající vysoké prodejní ceny. V Asii se damašková ocel hojně vyrábí dodnes, avšak v menší míře, než tomu bylo dřív. V Evropě, asi od 11 století, je od výroby damaškové oceli pozvolna opouštěno, díky její náročnosti a neekonomičnosti oproti moderním metalurgickým technologiím. Hodně lidí si také výrobu damaškové oceli spojovali s magií, což je samozřejmě mýtus dávných dob [1,4].

### 2.1.3 K výrobě není potřeba magie

V minulosti byli kováři a jejich techniky zahaleny tak velkým tajemstvím, že se jejich současníkům jevíli jako mágové. Přispívala k tomu zatemnělá dílna (pro lepší rozpoznávání barvy rozžhavené oceli), a mumlání veršů, které mnozí lidé považovali za zaklínadla, i když to byly pouze počty a měření doby trvání jednotlivých pracovních kroků [4].

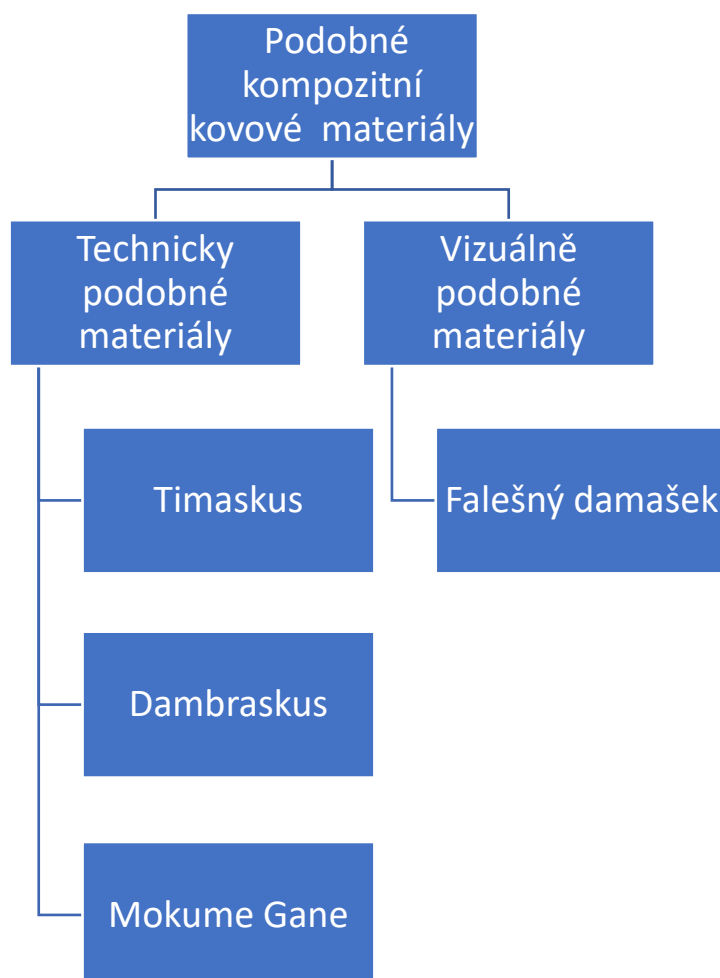


### 3 Druhy damaškové oceli

Existují tři typy damaškové oceli. Krom toho rozlišujeme ještě další různé ocelové materiály, které mají technickou, vizuální a koncepční podobnost s damaškovou ocelí. Přehled daných druhů je uveden v **obr. 2** a **obr.3** [4].



**Obr. 2** Typy damaškové oceli [4]



**Obr. 3** Typy materiálů podobné damaškové oceli [4]

### 3.1 Svářkový damašek

Pod pojmem svářkový damašek označujeme materiál, který je vyráběn ze dvou nebo více kusů různých druhů kovů nebo ocelí. V nejjednodušším případě se jedná o kusy plechu (takzvané pakety, vyfoceny na **obr.4**) vyrobené ze dvou materiálů s různým chemickým složením, v ideálním případě například z ocelí, kde jedna ocel má velký obsah uhlíku (například nástrojové oceli) a druhá ocel nízký obsah uhlíku (například ocel konstrukční), které jsou střídavě vrstveny do paketů, a poté kvůli soudržnosti obvodově svařeny a zahřívány na cca 1100-1200 °C. Poté se mohou začít svařovat kováním, či jinou tvářecí technologií, například válcováním nebo lisováním [4,5].



**Obr. 4** Paket připravený na kovářské svařování [5]

Strukturu lze zviditelnit následným naleptáním povrchu vyrobeného kusu. Vzory vytvořené ve svářkovém damašku lze ovlivnit mnoha způsoby, například tvarem použitých výchozích materiálů a různými technikami tváření. Kontrast vzoru nám určuje především obsah uhlíku a legujících prvků daných ocelí, které jsme použili a také jejich relativní poloha v elektrochemické řadě. Z legujících prvků, které se nejvíc podílí na kontrastu struktury je vhodné uvést zejména nikl a mangan, kdy nikl nám tvoří světlou část a mangan tmavou část struktury. Naopak právě antikorozi oceli s obsahem chromu lze kovářsky svařovat pouze obtížně. Pasivní vrstva oxidu chromitého, která se při zahřátí tvoří na povrchu oceli brání spojování materiálu [1,4].

---

## 3.2 Časté chyby při výrobě svářkového damašku

Při spojování dvou nebo více druhů ocelí často dochází k technologickým chybám. V následující kapitole si představíme, proč k těmto chybám dochází a jak se projevují.

### Neúspěšné spojení materiálu

V případě, že se nám nepodařilo materiály vůbec spojit, se jedná o špatně prohřátý materiál. Základním pravidlem pro spojení je dosažení teploty svařování, pokud je materiál nerovnoměrně, nebo nedostatečně prohřátý nemůže dojít ke spojení. Dále nám spojení může ovlivňovat také výběr materiálu pro svářkový damašek (tomuto tématu je věnována kapitola 3.3). Pokud špatně zvolíme materiál, například ocel, která je tlakově nesvařitelná nemůže k dokonalému spojení nikdy dojít. Také špatná volba tavidla, špatné odstranění pasivní vrstvy, nebo kontaminace materiálu při ohřevu (k tomuto jevu nejčastěji dochází při ohřívání ve výhni, případě pece je to méně pravděpodobné) mohou způsobit špatné spojení, nebo ho dokonce znemožnit. Jde především o kontaminaci zinkem. Zinek značně znemožňuje kovářské a tlakové svařování [1,4,6].

### Praskání materiálu při tváření

V tomto případě se jedná o přehřátí materiálu. S tímto ovšem souvisí také výběr materiálu, jelikož některé materiály mají hranici teploty přehřátí nižší, než samotnou teplotu vhodnou pro svařování [1,4,6].

### Spálení materiálu mimo svár a vady ve sváru

Pokud se materiál spálí mimo rozhraní jednotlivých vrstev (sváru) znamená to, že teplota je nižší uprostřed než po stranách paketu. Bývá to důsledkem špatně udržované teploty při ohřevu, ať už se jedná o výheň, nebo například elektrickou či plynovou pec. Pokud se nám objevují vady na rozhraní vrstev, jedná se opět o nedostatečně prohřátý materiál (jádro paketu vykazuje nižší teploty než okraje), nedostatečně obroušenou či jinak opracovanou pasivní vrstvu, kontaminaci rozhraní netavitelným materiálem, nedostatečné protváření materiálu a nedostatečný odtok roztavených okují při spojení krajů paketu [1,4,6].

### 3.3 Materiály vhodné pro výrobu svárkového damašku

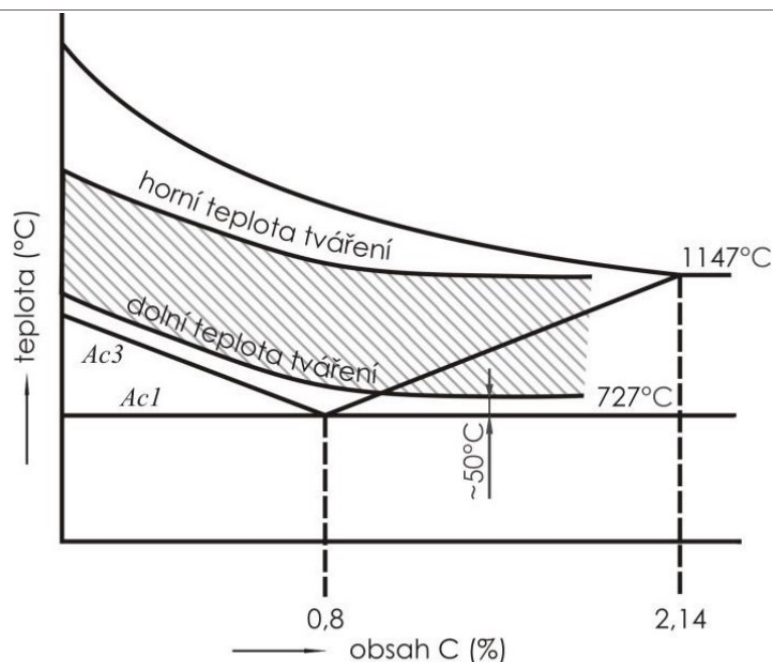
Vhodnost materiálu pro přípravu a vytvoření svárkového damašku nám ovlivňuje mnoho faktorů, prvků a procesů, které budou popsány v dalších kapitolách. Oceli, které budou uvedeny dále, jsou ve většině případů ve formě polotovarů z úzkých a krátkých plechů, jak je vidět na **obr. 5**, hlavně z důvodu vhodnosti tvaru pro svařovaný paket [4].



**Obr. 5** Polotovary z plechů vhodné pro svárkový damašek [4]

#### 3.3.1 Obsah uhlíku

Mimořádně důležitým faktorem pro výběr materiálu na výrobu svárkového damašku je obsah uhlíku. Uhlík je jeden z nejdůležitějších prvků obsažených v ocelích a výrazně určuje mechanické vlastnosti. Když obsah uhlíku roste, zvyšuje se nám pevnost v tahu, avšak snižuje se nám tvářitelnost. Přibližně od obsahu uhlíku 0,3 % je možno danou ocel tepelně zpracovávat. Obsah uhlíku určuje dolní tvářecí teplotu ( $T_{\min}$ , DTT), to znamená minimální teplotu, při které lze materiál deformačně spojovat tvářením. Dále obsah uhlíku také určuje, jakou teplotu ( $T_{\max}$ , HTT) materiál vydrží, než dojde k prasklinám a částečnému oduhličení. V tomto případě je závislost nepřímo úměrná: čím vyšší je obsah C, tím nižší je  $T_{\max}$  (HTT) avšak tento případ platí pro obsah uhlíku do 0,8 % (pro názornost se lze podívat na **obr. 6**). Tyto dvě hodnoty omezují teplotní interval, ve kterém lze daný materiál tlakově spojovat (tvářením) za tepla. Pokud mají být spojeny materiály s různým obsahem C, musí být materiál paketu v oblasti, kde se oba (nebo všechny) teplotní intervaly překrývají. Z toho vyplývá, že v případě kombinací materiálů s velmi odlišným obsahem uhlíku je tato oblast překrytí velmi malá, což značně ztěžuje úspěšnost spojení [4,7,8].



**Obr. 6** Graf oblasti tvářecích teplot [8]

### 3.3.2 Difúze uhlíku

Ve struktuře materiálu se uhlík snaží distribuovat co nejrovnoměrněji. „Putuje“ z míst s vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací. Čím vyšší je teplota materiálu, tím rychleji dochází k této difúzi uhlíku. Vrstvy se navíc stále ztenčují, což znamená, že vzdálenost, kterou musí uhlík cestovat se stále zmenšuje. Jelikož je damašková ocel během svařování vystavena velmi vysokým teplotám, lze předpokládat, že tenkovrstvé materiály mohou být zcela homogenizovány. Obsah uhlíku ovlivňuje také chování leptaného damašku, pokud se snažíme dosáhnout určité estetické úrovně. Pokud se jedná o relativně hrubou strukturu, ve které se obsah uhlíku nehomogenizoval, reagují složky s kyselinou odlišně. Materiály s vysokým obsahem uhlíku jsou napadeny daleko více, než materiály s nízkým obsahem C. Pokud se materiál leptá krátkou dobu, je to většinou vyjádřeno na povrchu pouze barvou, pokud se však leptá delší čas, vytvoří se znatelný reliéf. Ten lze použít k zesvětlení vyvýšených ploch jemným broušením nebo leštěním, a tím ke zvýšení kontrastu a v případě potřeby k integraci odstínů, které podtrhují plastičnost reliéfu. Barevný kontrast, který je tvořen různými obsahy uhlíku, je poměrně jemný, málo znatelný, jsou to většinou jen různé odstíny šedé barvy. Aby se dosáhlo silných kontrastů, měly by materiály obsahovat další přísadové prvky, které si představíme v následujících podkapitolách. Nejzajímavějšími prvky, které podtrhují vzhled námi požadovaného vzoru jsou mangan a nikl. Mnoho dalších možných přísad má také vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Na druhou stranu mají malý vliv na schopnost spojování za tepla a na zbarvení leptáním [4].

---

### 3.3.3 Mangan

Zajišťuje během procesu leptání tmavší zabarvení materiálu a je proto vhodný pro dosažení silných kontrastů s vyšší kvalitou uhlíkové oceli. Mangan bývá obsažen v oceli ve formě stopových prvků a nečistot. Pokud přidáváme mangan záměrně, zvyšujeme tím prokalitelnost a pevnost v tahu avšak ocel se stává náchylnější k přehřátí a k popouštěcí křehkosti [4,7,9].

### 3.3.4 Nikl

Nikl představuje opačný pól než mangan: materiál reaguje s kyselinou v menší intenzitě, a proto si zachovává světlejší barvu než mangan. Svařitelnost není niklem ovlivňována a oceli ze slitiny niklu jsou obvykle relativně odolné vůči teplu. Při tváření tak kladou větší deformační odpor, hůř se deformují, proto u ocelí s vysokým obsahem niklu je potřeba dobře zvážít tloušťky jednotlivých vrstev daného damašku. Mimo jiné nikl zlepšuje prokalitelnost, houževnatost při nízkých teplotách a má nemagnetické vlastnosti. Nikl také představuje určitá zdravotní rizika, proto je potřeba při jeho zpracování přijmout vhodná ochranná opatření [4,7,9].

### 3.3.5 Chrom

Chrom se řadí mezi feritotvorné prvky a u nízkolegovaných ocelí se přidává z důvodu zvýšení prokalitelnosti materiálu. Značně také zvyšuje tvrdost dané oceli ale reaguje při zahřátí s okolním kyslíkem za vzniku oxidu chromitého, který brání úspěšnému spojování materiálů. Materiály s významným obsahem chromu lze proto spojovat tvářením za tepla pouze za zvláštních podmínek nebo se speciálním postupem přípravy (atmosféra ochranného plynu, vakuum, odstranění pasivní vrstvy před kompletací paketů). V ocelích, které mají nižší obsah uhlíku je považováno za optimální množství chromu mezi 12 až 14%. Pokud hovoříme o oceli s vyšším obsahem uhlíku, nebo o oceli, kde klademe důraz na odolnost proti korozi se požadavek obsahu chromu zvyšuje až na 14 až 16% [4,7,9].

### 3.3.6 Běžné oceli

V této kapitole budou představeny oceli běžně dostupné, které jsou vhodné pro výrobu svárkového damašku. **Tabulka 1** níže, stručně popisuje dané vlastnosti jednotlivých ocelí pro poskytnutí určitého informačního a technologického základu [4].



**Tabulka 1** Vhodné oceli a jejich vlastnosti [4,10-13]

Materiál	Norma	Zbarvení	Svařitelnost	Teplota žíhání na měkko [°C]	Teplota kalení [°C]	Tvářecí teplota [°C]
Nástrojová ocel	1.2842 (90MnCrV8)		+	680-720	790-820 (Olej)	1050-850
Nástrojová ocel	1.2206 (140CrV1)		-	710-740	770-800 (Voda)	1000-850
Ložisková ocel	1.3505 (100Cr6)		-	780-800	800-830 (Olej)	1205-925
Pružinová ocel	1.5026 (55Si7)		--	640-680	820-870 (Olej)	1050-850
Konstrukční ocel	1.0037 (S235)		+	-	-	-
Nástrojová ocel	1.2796 (75Ni8)		+	650-700	800-830 (Olej)	1200-1010
Nástrojová ocel	1.2767 (X45NiCrMo4)		-	610-650	840-870 (Olej)	1050-850
Antikorozní ocel	1.4301 AISI304 (X5CrNi18-10)		+	-	-	1200-900
Nástrojová ocel	1.2379 AISI D2 (X153CrMoV12)		-	800-850	1060-1080 (Olej)	1050-850

### 3.3.6.1 Nástrojová ocel 1.2842 (90MnCrV8)

Tato ocel bývá jakousi klasikou mezi materiály pro výrobu svárkového damašku. Díky svým charakteristickým tmavým vzorům, dobré svařitelnosti a obsahu uhlíku (0,85-0,95 %) je ocel použitelná pro většinu aplikací, především jako tmavá vrstva damašku. Jedná se o běžnou nástrojovou ocel pro práci za studena s vysokým obsahem uhlíku, je však málo odolná proti korozi. Dosahuje tvrdosti až 60-64 HRC a tím je vhodná pro tvorbu odolného ostří. Je dostupná v mnoha formách dodání a za relativně nízkou cenu [4,10].

### 3.3.6.2 Nástrojová ocel 1.2206 (140CrV1)

Díky svému značně vysokému obsahu uhlíku (1,35-1,45 %) je tento materiál obtížně svařitelný, ale je ideální pro vysoce výkonné řezání. Z tohoto důvodu se používá jednotlivě nebo v kombinaci se stejně silnou ocelí jako střední vrstva čepele. Jedná se taktéž o nástrojovou ocel pro práci za studena, která má využití převážně jako trny a matrice pro tažení, gravírovací nástroje nebo kotoučové řezné a stříhací nástroje. Dosažitelná tvrdost této oceli se pohybuje kolem 56-65 HRC [4,10].

---

### 3.3.6.3 Ložisková ocel 1.3505 (100Cr6)

Ocel, která má hlavní využití v kuličkových ložiscích jako hlavní valivé elementy také disponuje výbornými řeznými vlastnostmi, což z ní dělá dalšího vhodného kandidáta pro použití v damaškové oceli pro čepele. Je to chromem legovaná ocel, která je kalitelná v oleji, s dobrou otěruvzdorností a houževnatostí. Kombinace s nástrojovou ocelí vede k vysoce kvalitnímu damašku [4,14].

### 3.3.6.4 Pružinová ocel 1.5026 (55Si7)

Tento materiál není zcela vhodný pro výrobu svařovaného kompozitního damašku. Má špatnou svařitelnost, avšak pružnost této oceli dává šanci na její využití při aplikaci pružné vrstvy nebo části čepelí. Využít v damašku se taky dá jako kontrastní část materiálu, pokud není kladen velký požadavek na mechanické vlastnosti. Její ostatní technická využitelnost jsou listové nebo vinuté pružiny pro nákladní automobily či podvozky kolejových vozidel. Její tvářecí teplota je 850-1050 °C a při správném postupu žíhání na 640-680 °C a pomalém dochlazování v peci lze dosáhnout tvrdosti až 254 HB [4,11].

### 3.3.6.5 Konstrukční ocel 1.0037 (S235)

Vzhledem k velmi nízkému obsahu uhlíku (0,17-0,20 %) je rozsah teploty vhodné pro spojování této oceli velmi vysoký, což vede k problémům při její kombinaci s materiály s vysokým obsahem uhlíku. Materiál nelze vytvrdit a po leptání má poměrně nevýraznou barvu. Jeho výhodou je jeho široká dostupnost a nízká cena, stejně jako skutečnost, že tato ocel je odolná vůči přehřátí. Používá se pro méně namáhané díly ocelových konstrukcí a ve strojírenství. Nepovažuje se však mezi kováři a výrobci damaškových ocelí za praktický materiál, protože při přechodu na materiály s vyšším uhlíkem se výrobci musí přizpůsobovat velkému teplotnímu rozsahu tvářecích teplot [4,15].

### 3.3.6.6 Nástrojová ocel 1.2796 (75Ni8)

Nástrojová ocel legovaná niklem, jejíž obsah uhlíku je podobný oceli 1.2842, která se považuje za „kontrastního partnera“ k této oceli a tím také zjednodušuje svařování těchto materiálů. Přítomnost niklu vede k výraznému barevnému kontrastu, avšak tato ocel není běžným typem nástrojových ocelí a její dostupnost bývá v určitých množstvích omezená. Ocel vhodná pro výrobu tenkých nožů, je velice pružná, dosažitelná tvrdost činí 60 HRC [4,16].



### 3.3.6.7 Nástrojová ocel 1.2767 (X45NiCrMo4)

Tato ocel je dobrou alternativou k oceli 1.2796 (výše uvedena). Díky silnému kontrastu s ocelí 1.2842 (90MnCrV8) a dostatečnému obsahu uhlíku je tato ocel velmi populární při výběru pro damašek na ostří nožů. Díky obsahu chromu (cca 1,3%) je spojování tvářením trochu obtížné. Tato ocel také není příliš běžným materiálem, takže vysoká cena a nižší dostupnost se bohužel řadí mezi negativní vlastnosti této oceli. Použití této oceli: nástroje pro tvářením za tepla (malé zápustky), nože pro stříhání materiálů za studena a nástroje pro ražení za studena [4,10].

### 3.3.6.8 Antikorozní ocel 1.4301 AISI 304 (X5CrNi 18-10)

Tato antikorozní ocel bude použita v experimentu této práce. Jde o druh austenitické korozivzdorné oceli, která se používá ve strojírenství, vodárenství, gastronomii a zdravotnictví. Jedná se o nejvíce rozšířenou korozivzdornou ocel na trhu s nízkým obsahem uhlíku (0,07 %). Je poměrně dobře svařitelná, má dobrou tažnost za studena a při tvářením dochází k zpevňovacím procesům, je to dobře kujná ocel [12].

### 3.3.6.9 Nástrojová ocel 1.2379 AISI D2 (X153CrMoV12)

Tato ocel bude použita jako sekundární vrstva v materiálu z experimentu v této práci. Jedná se o nástrojovou ocel pro práci za studena. Má vysoký obsah uhlíku a chromu (C 1,45-1,60 %, Cr 11-13 %). Disponuje vysokou odolností proti otěru, dobrou prokalitelností a vyšší korozní odolností. Samokalením na vzduchu lze dosáhnout tvrdosti do 56 HRC, její maximálně běžně dosažitelná tvrdost je 61-63 HRC. Používá se pro střížné a lisovací nástroje, průmyslové nože a razníky [10,13].

### 3.3.7 Vhodné kombinace materiálu pro svárkový damašek

V praxi se osvědčily následující kombinace různých materiálů. V **tabulce 2**, níže, jsou uspořádány podle rostoucí obtížnosti zleva doprava, dále pak na **obr. 7** je ukázán vzor který vznikl kombinací ocelí 1.2842 a 1.2796 [4].

**Tabulka 2** Kombinace materiálů pro svárkový damašek [4]

Nástrojové oceli 1.2842 + 1.2796	Nástrojové oceli 1.2842 + 1.2767	Nástrojová ocel 1.2842 + Nikl	Nástrojová ocel 1.2206 + Ložisková ocel 1.3505
+ dobrá svařitelnost	- nízká svařitelnost	- není vhodné pro řezné nástroje, pouze jako dekorace	+ vysoký řezný výkon
+ dobrý černo- stříbrný kontrast	+ velmi dobrý černo-stříbrný kontrast	+ výborný černo- stříbrný kontrast	- obtížné zpracování a nevýrazný kontrast

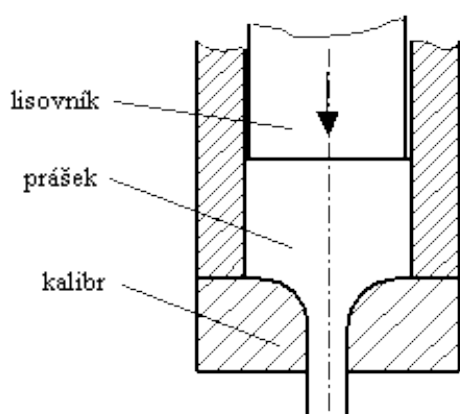


**Obr. 7** Vzor svárkového damašku z kombinace nástrojových ocelí 1.2842 + 1.2796 [4]

### 3.4 Damašek vyrobený technologií práškové metalurgie

Proces výroby damašku pomocí práškové metalurgie se řídí podobným principem, jaký se používá také u svárkového damašku. Jednotlivé kusy oceli a slitinových přísad se spojí například lisováním do jednoho kusu. Rozdíl však spočívá na jedné straně ve velikosti použití kovových kusů a na druhé straně v procesu spojování za tepla [4,6].

Technologie práškové metalurgie, používá velmi malé částice (zrnitost cca 0,1 mm). Ty jsou vyrobeny atomizací taveniny inertním plynem. Atomizace taveniny je proces výroby vysoce kvalitních kovových prášků. Je založena na principu působení tlakového plynu na tekutý kov, kdy dochází k rozstříkávání taveniny. Vytvořené kapky následně tuhnou v důsledku rychlého ochlazení v rozstříkovacím médiu. Čím větší je přehřátí, to znamená, že čím nižší je viskozita taveniny a čím vyšší je mechanická energie působící na taveninu, tím větší je podíl jemného prášku. Tento jemný ocelový prášek je pak smíchán podle požadovaného složení slitiny a poté slinován do bloku při vysokém tlaku a teplotě, jak nám ukazuje schéma na **obr. 8** [4,17-19].



**Obr. 8** Schéma lisování ocel. prášku [18]



**Obr. 9** Kulatina Damasteel Bluetongue [19]

---

Výsledné produkty se vyznačují velmi rovnoměrnou a jemnozrnnou strukturou. Z toho plynoucí vlastnosti jsou enormní houževnatost a pevnost v lomu. Tato technologie také nabízí možnost výroby komponentů se složitými geometrickými požadavky a snižuje následné opracování na minimum. Další výhodou je, že za použití ochranné atmosféry, nebo vakua, lze slinovat také korozivzdorné oceli, které obsahují chrom (Cr). Pokud se ocel nedostane do kontaktu se vzdušnou atmosférou, netvoří se povlak oxidu chromitého, který by jinak bránil ve spojení dvou materiálů. Výrobě damaškové oceli pomocí práškové metalurgie se v současnosti nejvíce věnuje švédská firma Damasteel, která má různé vzory dokonce patentované, jako například vzor Bluetongue na **obr. 9** [4,19].

### 3.5 Litý damašek (Wootz, Bulat)

V minulosti také nazýván skutečnou damaškovou ocelí. Může to být způsobeno skutečností, že právě s tímto materiálem se nejvíce manipulovalo v obchodní metropoli-Damašku. Vyráběl se však ve značném množství v Mezopotámii a Persii, ale nejvíce ve východní Indii. Podle historiků jsou však za nejkvalitnější zbraně považovány ty, které byly vyrobeny na území dnešního Íránu. Vyvinut byl později než svářkový damašek. Termín Wootz pochází z indického jazyka, podle studie indologa Jürgena Hannedera z univerzity v Halle je odvozen od sanskrtského slova „Vuds“, což znamená „vysoce kvalitní“ ocel nebo železo [4,6,20].

Wootz nebo-li Bulat je ocel se speciální strukturou. Má vynikající mechanické vlastnosti, jako je houževnatost a velký modul pružnosti v ohybu. Tato speciální ocel má krystalickou, dendritickou strukturu, která umožňuje dosahovat výše zmíněných vlastností. Wootz je materiál srovnatelný s moderními práškovými slitinami kovu a dodnes patří mezi velice drahé materiály. Kromě vysokého obsahu uhlíku (cca. 1,5 %) je rozhodujícím faktorem pro výjimečné vlastnosti speciální slitinové složení, které se v počátcích vzniku Wootzu nacházely pouze v železných rudách v oblasti Indie. Byly vzácné, protože obsahovaly dosud neobjevené prvky jako je molybden a vanad. Tyto přísadové prvky, přesně definovaná teplota a doba ochlazování a setrvání na teplotě zaručují následné uspořádání prvků podél hranic zrn, kdy se pak tvoří daný vzor uspořádaný do vláken, kterému se říká primární vzor. Tento primární vzor bývá viditelný již na povrchu ingotu Wootzu [4,6,20].

### 3.5.1 Výroba litého damašku

Wootz ingoty se vyrábějí tavením kovu v peci, v žáruvzdorném kelímku (jak lze vidět na **obr. 10** níže), který tvoří redukční prostředí, za teplot 1200–1500 °C bez přístupu vzduchu. Přístup vzduchu je v tomto případě velmi nežádoucí, docházelo by k zpětné oxidaci uhlíku v tavenině vzdušným kyslíkem. Takto vyrobený materiál je potřeba ještě opakovaně kovat v určitém teplotním rozsahu, čímž se nám uhlík začne více vázat na jednotlivá vlákna kovu a ve výsledném vzoru vytváří ještě větší kontrast, zvlášť když ještě výrobce přistoupí k naleptání povrchu, čímž se nám struktura ještě více zviditelní [4,6,20].



**Obr. 10** Kelímek pro tavbu Wootzu [6]

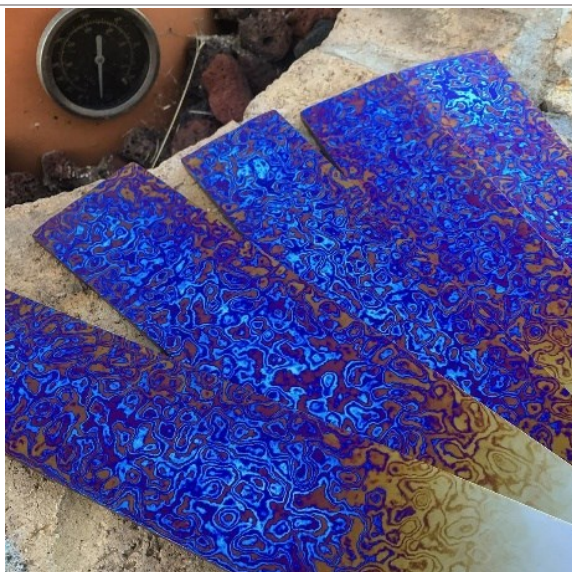
## 3.6 Podobné kompozitní materiály

### 3.6.1 Timaskus

Timaskus je poměrně nový materiál, který je složený ze dvou různých titanových slitin. Za vznikem Timasku stojí Tom Ferry, Bill Cottrell a Chuck Bybee. Jejich cílem bylo vytvořit antikorozi, nemagnetický, lehký materiál, který nemá negativa damaškových ocelí, má lepší vlastnosti a výrazně přidá na estetické stránce damašku. Po měsících úspěšných i neúspěšných pokusů se jim podařilo vyvinout Timaskus, pomocí překládání titanových pásků, které se následně kovářsky svaří, podobně jako damašková svárková ocel. Při zkoušení vlastností Timaskus dosáhl stanovených cílů a nejenže přidává na vzhledu, ale v mnoha případech může zlepšit celkový řezný výkon nože [4,21].

Timaskus je velice variabilní co se týče estetiky a vzhledu struktury. Různé titanové slitiny se odlišně zbarvují pomocí tepla a eloxování (chemicko-tepelná úprava povrchu). Pokud povrch před eloxováním ještě důkladně vyleštíme, dosahujeme ještě lepších estetických vzorů, např. jako zde na **obr. 11** níže. Výroba Timasku je patentovaným procesem a nese ochrannou známku. Jeho cena se pohybuje přibližně kolem 1200-2000 USD za kilogram [21,22].





**Obr. 11** Polotovary pro výrobu nožů z Timasku [22]

### 3.6.2 Mokume Gane

Mokume Gane je stará kovářská technika, která zahrnuje kombinování různých barevných a drahých kovů (včetně mědi, stříbra a zlata) a jejich slitin. Její počátky se datují až do 17. st. našeho letopočtu v Japonsku. Struktura je v podstatě podobná, jakou má damašková ocel, rozdíl je pouze v tom, že Mokume Gane má jiné výchozí materiály pro výrobu, které jsou zmíněny výše [4].



**Obr. 12** Prsteny Mokume Gane, kombinace zlata a stříbra (Au/Ag) [23]

Kroucené, vířivé a vlnité obrazce ve struktuře, jak lze vidět na **obr. 12**, které tvoří Mokume Gane, připomínají damaškovou ocel. Mokume Gane byla technika původně používána pro výrobu mečů, nyní tímto způsobem vyrábíme ve většině případů šperky, nebo dekorální předměty. Základem výroby Mokume Gane je spojení plátků různých kovů v jednolitý, kompaktní blok, přičemž je zachována vrstvená struktura – nedochází k mísení kovů, nevzniká jejich slitina. Spojování se provádí pomocí difuzního svařování, což je proces, který probíhá pod velkým tlakem, za přesně stanovené vysoké teploty a v přísně kontrolované

redukční atmosféře. Vzniklý bloček je následně překováván, kroucen a vytahován. Kombinací technik, zahrnující broušení, rytí, řezbu do kovu, nebo například leptání, je dosažen výsledný vzhled šperku, nebo dekoračního předmětu [23,24].

### 3.6.3 Dambraskus

Jedná se o druh materiálu, který má svůj název odvozený od slova „Brass“, v anglickém překladu je to mosaz. Vyrábí se neobvyklým způsobem, kdy se ocelové lano zahřeje až do žluté barvy a následně se ponoří do kelímku s roztavenou mosazí. Tekutý kov pak proniká do pórů ocelového lana a vytváří se nové spojení. Výsledný kus lze pak nadále zpracovávat tradičními kovářskými technikami. V roce 1994 tuto techniku vyvinul Američan Gene Osborn [4,25].

### 3.6.4 Falešný damašek

Ke konci 19. století, v době industrializace, kdy se damašková ocel těšila enormní popularitě při použití na chladné nebo palné zbraně (dekorace), byly hledány způsoby, jak tento materiál vyrábět ve velkém měřítku, nebo ho ve velkém aspoň replikovat. Řešení bylo nalezeno v použití dekorativního leptání, které napodobovalo různé damaškové vzory na povrchu monoocelových výrobků. K dosažení tohoto efektu byl použit litografický proces, při kterém je povrch výrobku leptán v kyselé lázni podle předem předkreslené šablony k dosažení požadovaného vzoru. Jako šablona byly použity buď skutečné damaškové vzory, nebo ty, které byly nakresleny ručně. Za účelem zvýšení kontrastu se používaly také různé techniky leštění. Vzor této oceli je tedy pouze umělý, je pouze na povrchu materiálu. Nemá žádnou souvislost se strukturou dané oceli a lze jej poměrně jednoduše odstranit broušením. Proces lze ještě obohatit o zlacení, což bylo hojně využíváno například ke zdobení čepelí mečů. To, jak skutečně vypadá takový leptaný dekor závisí do značné míry na použitých šablonách a technikách leštění, v neposlední řadě na zručnostech a zkušenostech výrobce. Na **obr. 13** lze vidět strukturu nože, který byl vyroben z falešného damašku, jako důkaz to potvrzuje přechodová hranice mezi použitými šablonami, přibližně v polovině obrázku [4].

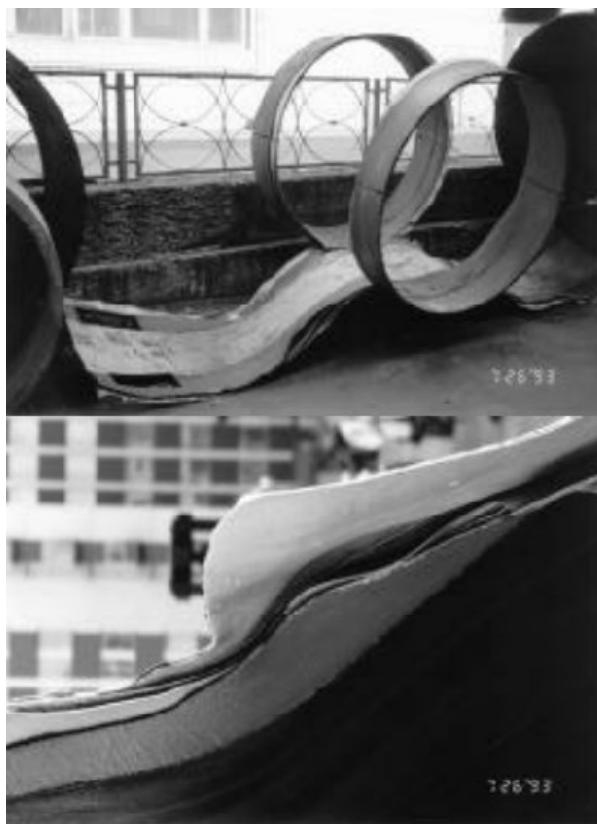


**Obr. 13** Detail struktury nože z falešného damašku [4]

## 4 Mechanické vlastnosti kompozitních kovových materiálů

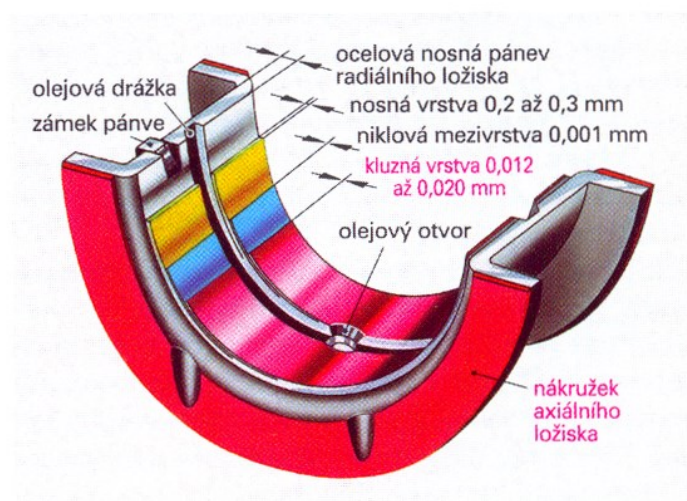
Jak je již popsáno v předchozích částech práce, existuje celá řada důvodů, proč byla vynalezena kompozitní a damašková ocel. V této kapitole budou popsány některé mechanické vlastnosti těchto materiálů a taky uvedeny různé konkrétní příklady materiálů, které danými vlastnostmi disponují a dle mého názoru stojí za zmínku.

Praktická aplikace kovových kompozitů se mnohem více rozvíjela v bývalém Sovětském svazu než v západním světě. Současné použití technologie kompozitních kovových materiálů je nejrozsáhlejší v aplikacích, kde je potřeba vysoké odolnosti proti lomům a prasklinám, jako jsou například potrubí o velkých průměrech, vysokotlaké potrubí, vysokotlaké nádoby a podobné aplikace. U těchto aplikací jsou tenké ocelové plechy pevně zabaleny dohromady a svařeny, aby vytvořily soustředné kapsle, které odolávají šíření trhlin po celé tloušťce materiálu. Tento způsob výroby trubek, který byl vyvinut na Patonově svářečském institutu na Ukrajině je velice pozoruhodný, protože má vylepšené také mechanické vlastnosti ve směru podélném, převážně houževnatost, čehož je docíleno pomocí obvodových segmentů, periodicky umístěných okolo trubky, jak lze vidět na **obr. 14** níže [2,26,27].



**Obr. 14** Trubka z kompozitní oceli, vyvinuta na Ukrajině [26]

Neexistují však pouze materiály ocel/ocel, jako je zmíněno výše, ale lze vyrobit i materiály které zahrnují kombinace Al/ocel, Cu/ocel a nebo také Al/Cu. Tyto kompozity lze vyrábět svařováním výbuchem a mnoha dalšími technikami svařování, které byly vyvinuté v Moskevském institutu a Novosibirském institutu vysokorychlostní hydrodynamiky. Tyto dvě organizace jsou zmíněny z toho důvodu, že v dobách výzkumů těchto kompozitních materiálů se jim podařilo vytvořit přes 80 kombinací různých materiálů. V současnosti je jejich hlavním produktem kompozitní materiál Al (tloušťka plechu 3 mm) / ocel + Cu (tloušťka plechu 20 mm), který se vyrábí pro použití ve velkých vznětových motorech lokomotiv a lodí, jako hlavní ojnicí ložiska. Ojnicí ložiska se však svým složením a provedením mohou lišit, jsou však všechna založena na principu kluzného ložiska. Jedna z možností provedení takového ložiska je uvedena na **obr. 15** [2,26-29].



**Obr. 15** Konstrukce kluzného ložiska [28]

Zatím všechny zmíněné materiály jsou v shrnutí vyrobeny pro aplikace, které požadují skvělou ochranu proti korozi a odolnost proti opotřebení a prasklinám nebo lomům. Pokud mluvíme o odolnosti proti opotřebení, tuto mechanickou vlastnost potřebujeme využívat v mnoha aplikacích. Dobrým příkladem jsou například zemědělské stroje, konkrétně jejich součásti a řezné nástroje, kde nám odolnost proti opotřebení hraje důležitou roli v zemědělské produkci a zisku. Pracovní hrany řezných nástrojů, jako jsou nože pro zpracování cukrové řepy a řezačky siláže, se vyznačují vysokou rychlostí (až 30 m/s) interakce se zpracovávaným materiálem. Jak nám provozní podmínky dokazují, jedna z hlavních nevýhod řezných zemědělských nástrojů je jeho neuspokojivá odolnost proti opotřebení. V tomto případě ale nastává určité dilema: použitím různých metod kalení je možné zvýšit tvrdost materiálu, to však ale současně, skoro vždy, snižuje lomovou houževnatost [2,26,29,30].

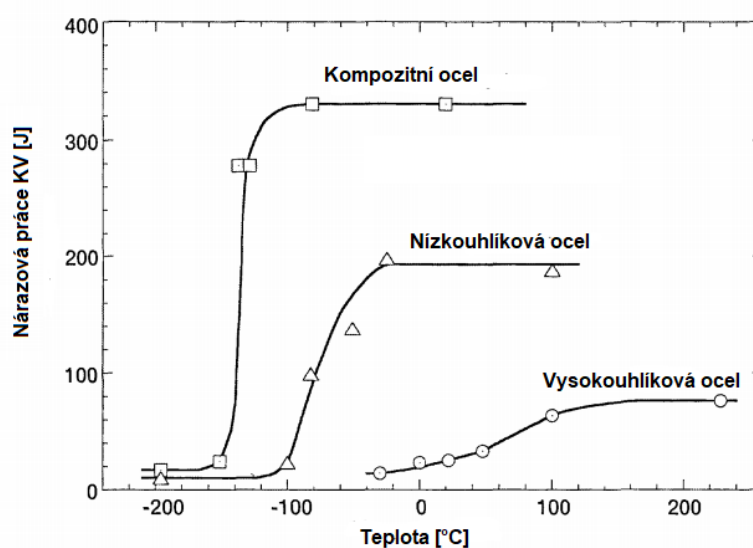


Tento problém je možné řešit vytvořením vícevrstvého kompozitního ocelového materiálu s různými funkčními vrstvami. V tomto případě je zvýšení rázové pevnosti spojeno s úbytkem náchylnosti k praskání, což zajišťuje tvárná složka v kompozitním materiálu. Jednou z forem těchto materiálů je vícevrstvý ocelový kompozit, který je ve srovnání s tradičními slitinami lepším materiálem, je vhodný pro řezné nástroje odolné proti opotřebení, jako jsou již zmíněné řezné nástroje pro zemědělství, ale také i pro domácí použití (kuchyňské nože, rotační nože do kuchyňských mixérů apod.) [2,26,29,30].

Proces samoostření během provozu je další velmi důležitou vlastností vícevrstvého ocelového kompozitu, který umožní udržovat vysokou řeznou kapacitu nástroje, během celé doby provozu. Samoostření spočívá v zachovávání geometrie řezné hrany, a to se děje hlavně díky tomu, že každá vrstva materiálu vykazuje odlišnou míru opotřebení [2,26,29,30].

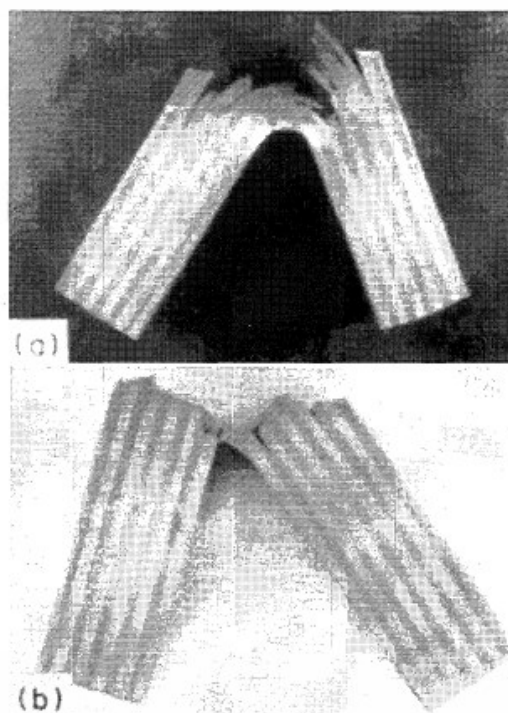
#### 4.1 Zvyšování rázové houževnatosti díky použití kompozitní oceli

Díky použití kompozitu, který se skládá z vrstev nízkouhlíkové a vysokouhlíkové oceli můžeme dosahovat velkých odolností vůči rázům. Jako dobrý příklad nám poslouží **obr. 16**, konkrétně tedy graf, který vychází ze studie D. W. Kuma, T. Oyamy, J. Wadswortha a O. D. Sherbyho. Výsledky jsou z Charpyho kladiva, které měří rázovou houževnatost materiálu, který je na obou koncích upevněn a úder je směřován do středu materiálu. Jedná se o ocelový vrstvený kompozit, který je sestaven z dvanácti vrstev vysoko a nízkouhlíkové oceli střídavě (6/6 vrstev). Pro porovnání byly zkoušky také vystaveny obě oceli zvlášť. Kompozitní ocel v tomto případě ukázala velice dobré vlastnosti v rámci odolnosti proti rázům oproti klasickým ocelím [26,29].



**Obr. 16** Graf rázové zkoušky pro dvanáctivrstvý ocelový kompozit [29]

Dramatické zlepšení rázových vlastností oproti konvenčním ocelím se přisuzuje delaminaci jednotlivých vrstev, která byla soustředěna pouze v místě dopadu Charpyho kladiva na zkušební vzorek. Schopnost snadné delaminace je proto klíčová vlastnost kompozitní oceli, pokud jde o rázovou houževnatost, protože se schopnost delaminace dá lehce řídit při výrobě (způsobem spojování) a tím pádem i řídíme a regulujeme rázovou houževnatost, která z výše uvedených důvodů plyne. S tím souvisí také tepelné zpracování tohoto materiálu, které nám určuje pevnost spojení jednotlivých vrstev. Byly proto přidány i vzorky, které prošly tepelným zpracováním, konkrétně kalením na přibližnou teplotu 770 °C do vody. Poté byly vzorky ještě žíhány na 650 °C. Tyto procesy tepelného zpracování neovlivnily výslednou pevnost materiálu nebo mikrostrukturu, ale ovlivnily soudržnost jednotlivých vrstev při následném spojování. Bylo zjištěno, že tepelným zpracováním této kompozitní oceli dochází k výraznému snižování rázové houževnatosti, protože tepelným zpracováním dochází k snižování schopnosti materiálu se delaminovat. Dokazují nám to také obrázky lomů zkušebních vzorků, které byly podrobeny rázové zkoušce, níže na **obr. 17** (bohužel obrázky mají zhoršenou kvalitu vlivem už nekvalitního zdroje z roku 1996, ale pro ilustraci by měly být dostatečné). Z fotografie plyne, že vzorek (a) disponuje větší rázovou houževnatostí [26,29].

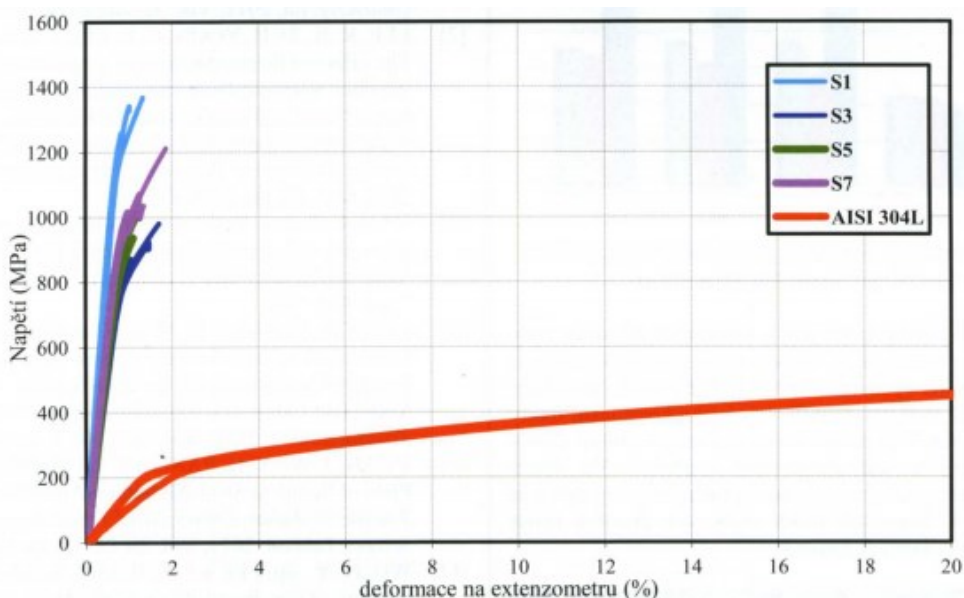


**Obr. 17** Porovnání jednotlivých lomů po rázové zkoušce [29]

(a) bez tepelného zpracování (b) tepelně zpracováno

## 4.2 Tahové vlastnosti ocelových kompozitů

Ve studii Kubiny a Nacházela [31] byla popsána příprava vícevrstvých ocelových kompozitních sendvičů válcovaných za tepla z austenitické antikorozi oceli AISI 304 a z martenzitické nástrojové antikorozi oceli se zvýšeným obsahem dusíku. Kompozitní sendviče (pakety) byly připraveny ze 3 až 7 vrstev těchto ocelí a byly na nich zkoumány mechanické vlastnosti. Vzorky byly válcovány za tepla, přičemž teplota přehřevu byla 1100 °C a první válcovací úběr činil výškovou redukci cca 23 %, další úběry měly výškovou redukci cca 27 % a všechny vzorky byly válcovány na tloušťku 4,1 mm. Tahové zkoušky byly provedeny na vzorcích, které byly orientovány ve směru válcování. Výsledky tahové zkoušky jsou zaznamenány v grafu na **obr. 18**, který vyjadřuje závislost smluvního napětí na prodloužení na, kde S1-S7 je označení jednotlivých sendvičů a počet jejich vrstev, přičemž S1 označuje vzorek pouze C-N-Cr oceli po tepelném zpracování na 57 HRC [31].



**Obr. 18** Graf závislosti smluvního napětí na prodloužení, tahová zkouška [31]

Z provedené zkoušky plyne, že sendviče z laminárních kompozitních ocelí dosahují menších tahových pevností než samotná ocel C-N-Cr. Nasvědčuje tomu taky fakt, že mezi kompozity měl největší pevnost v tahu sendvič se 7 vrstvami (1210 MPa), těchto výsledků je dosaženo proto, že měl také největší objemový podíl C-N-Cr oceli. Všechny vzorky, krom AISI 304 vykázaly křehký lom při přetržení. Samotná ocel AISI 304 vykazuje daný průběh zkoušky hlavně proto, že se vyznačuje vysokou tažností. Měla pevnost 580 MPa a prodloužení do lomu přes 80 % [31].

### 4.3 Zvyšování odolnosti proti šíření trhlin pomocí nízkotlakého lisování

Bylo dokázáno, že nízkotlaké lisování vícevrstevných kompozitů nám přináší daleko rozsáhlejší ochranu proti šíření trhlin. Abychom mohli získat pevný materiál s dobrou odolností proti šíření trhlin, potřebujeme v materiálu nejméně dvojici vrstev a jejich vyvážený poměr. Jedná se o jednu pevnou a druhou pružnou vrstvu, která pohltí případné tendence k praskání. Ve studii, kterou provedli E. J. Winn a I. W. Chen bylo zkoumáno šíření trhlin kompozitních materiálů na bázi zirkonia a hliníku. Navzdory přítomnosti hliníkové fáze vzorky prokazovaly vysokou pevnost v ohybu. Jak je uvedeno v časopise „Journal of the American Ceramics Society“ z prosince roku 2000, oba typy vzorků, které byly použity v experimentech měly identické konfigurace. Byly složeny ze 16 vrstev matrice z oxidu zirkoničitého a z 15 mezivrstev oxidu hlinitého, který sloužil jako „lepidlo“. Matrice oxidu zirkoničitého byly vyrobeny ze zirkoničitých suspenzí odlitých do pásů o tloušťce 100  $\mu\text{m}$ . Mezivrstvy, které tvoří lepidlo se skládají z porézního roztoku oxidu hlinitého. Do směsi práškového oxidu hlinitého a vody o kyselosti pH 4, byl přidán typ polymeru známý jako AST (alkali soluble swellable thickener, alkalicky rozpustné bobtnavé zahušťovadlo), který plní funkci pojiva. Za neustálého míchání se přidává NaOH, což mění kyselost směsi na pH 9. Změna pH způsobí zvětšování objemu AST, nikoliv však hmotnosti. Následné slinování způsobuje rozpad AST a zároveň vznik velkých pórů. Vzorky byly sestaveny naskládáním vrstev zirkoničitých pásek o rozměru 38x25,4x0,1 mm s tenkou vrstvou lepidla mezi nimi [2,26,27,29,30].

První vzorek byl připraven podle výše uvedeného postupu a lisován při teplotě 90 °C při deformaci 20 %. Druhý vzorek byl připraven lisováním za stejné teploty, avšak byla použita deformace 100 %. Oba vzorky byly sintrovány po dobu 30 minut při teplotě 1350°C. Vzorky byly vyleštěny a následně podrobeny tříbodovému ohybovému testu při posuvu 0,2 mm/min. Napětí v ohybu byly zaznamenány 580 MPa u vzorku č.1 a 540 MPa u vzorku č. 2. Po prozkoumání metalografických snímků, které byly zaznamenány v oblasti řezu kolmo k materiálu po celé tloušťce, bylo zjištěno, že vzorek č. 2 měl větší sklony k tvoření trhlin. Je to díky síle vyvolané lisem a nadměrné deformaci při přípravě vzorku č.2, která následně způsobila rozpad jednotlivých mezivrstev. Tento proces pak umožní šíření trhlin po celé tloušťce materiálu, protože druhý typ materiálu v tomto kompozitu nehraje roli, je nespojený, tudíž nemá vlastnosti kompozitu ale jednotného materiálu. U vzorku č.1 mezivrstvy zůstaly neporušeny, což mělo za následek daleko lepší odolnosti proti šíření trhlin, než v případě vzorku č.2. V obou případech však bylo šíření trhlin nejvíce koncentrované na rozhraní oxidu hlinitého se zirkoniem a díky tomu se jednotlivé vrstvy oddělovaly [2,26,27,29,30].

---

## 5 Cíle práce

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout, ověřit a případně optimalizovat postup přípravy kompozitních ocelových plochých vývalků na vratné duo stolici, která je součástí laboratorní polospojité válcovací tratě na Fakultě Materiálově-Technologické na VŠB-TU Ostrava. K realizaci tohoto experimentu bylo využito dvou typově velmi odlišných ocelí, a sice austenitické nerezové oceli AISI 304 a vysokouhlíkové nástrojové oceli AISI D2.

Po zvládnutí předchozího cíle bylo následně zapotřebí vytvořit kompozitní pakety o počtu vrstev 5, 15 a 45. Dalším dílčím cílem bylo na základě metalografických analýz posoudit kvalitu spojení jednotlivých vrstev.

Dalším předmětem zkoumání bylo posouzení vlivu počtu vrstev na mechanické vlastnosti, respektive na tvrdost. Následně byly výsledky tvrdosti srovnány i s hodnotami tvrdosti základních ocelí.

Jelikož se jedná o relativně náročný experiment i s ohledem na dosavadní zkušenosti s touto problematikou v prostředí zmíněné laboratorní polospojité tratě, bylo zapotřebí postupné práce a ověřování získaných výsledků, přičemž načerpávané zkušenosti byly ihned implementovány do procesu přípravy a samotného válcování. Z toho vyplývá, že realizace uvedeného experimentu, ač se zdá být jednoduchým, bylo z časového pohledu velmi náročné.

---

## 6 Experimentální část

### 6.1 Předválcovací vratná stolice

Válcování experimentálních vzorků bylo prováděno v laboratorní válcovně VŠB-TU Ostrava, konkrétně na její vratné duo stolici. Jedná se o polospojitou laboratorní válcovnu tyčí, která byla zprovozněna v roce 2012. Tato trať je přednostně určena k simulacím a optimalizacím procesů teplotně řízeného válcování a ochlazování kruhových tyčí a také ke studování procesů intenzivního tváření za tepla. Válcovací trať byla projektována se záměrem simulovat vybrané uzly válcování jednoduchých profilů na středojemné nebo drátové trati. Na trati lze válcovat vratně na hladkých válcích nebo kalibrovaných válcích s kalibrační řadou kosočtverec-čtverec nebo vratně a spojitě na válcích, které mají kalibry tvaru plochý ovál-kruh. Trať disponuje těmito aplikačními možnostmi [33-35]:

- lze simulovat vybrané procesy válcování na jemných profilových a drátových tratích a ovlivňovat vývoj struktury
- lze optimalizovat mechanické vlastnosti vývalků díky termomechanickému zpracování a řízenému ochlazování
- lze definovat a následně dosáhnout stupně protváření při válcování za tepla u větších vzorků v litém stavu
- lze zhutňovat kovové prášky intenzivní deformací díky vysokorychlostnímu spojitému válcování

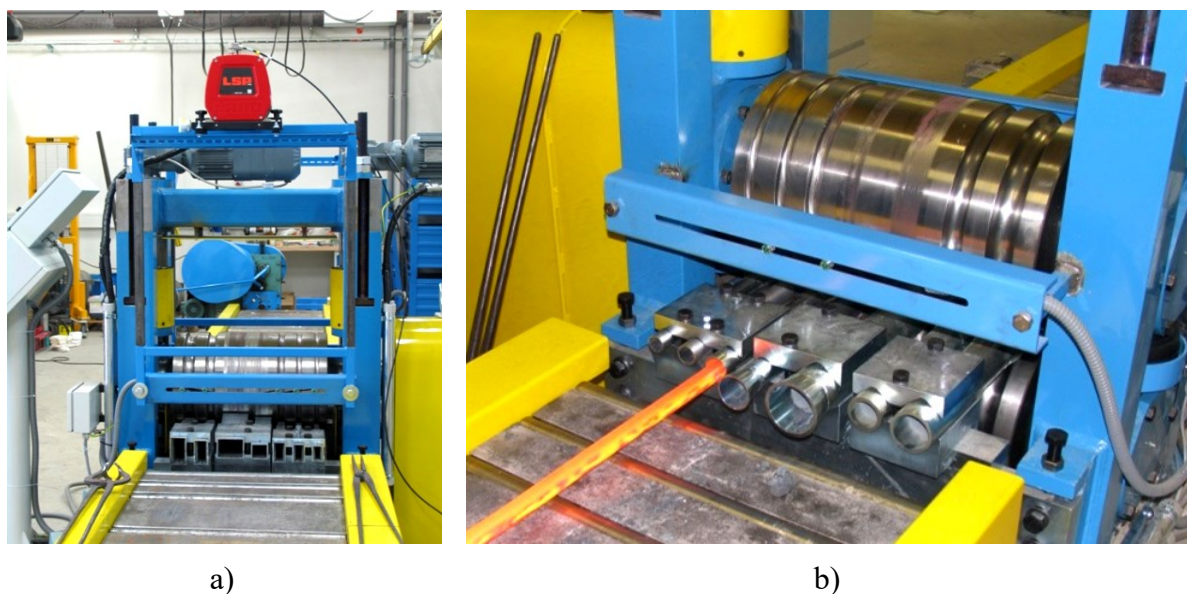
Vratná duo stolice je předurčena především k přípravě polotovarů pro spojitě hotovní pořadí, ale díky své vysoké univerzálnosti je možné na ní provádět celou řadu samostatných experimentů. Také proto na ní byl proveden experiment této práce. Vysokou univerzálnost této válcovací stolice ještě zvyšují čtyři různé sady válců, které budou popsány níže [33-35].

První sada válců umožňuje vyválnování kulatiny 15,8 mm z nápichu kulatiny 55 mm. Jedná se o sadu válců s průměrem až 350 mm. Druhá sada válců je určena pro válcování kulatiny o průměru 7,9 mm s tím, že průměr nápichu kulatiny je 26 mm. V případě těchto dvou zmíněných sad je kalibrační řada o tvaru plochého oválu-kruhu. Třetí sada válců s kalibrační řadou kosočtverec-čtverec umožňuje vyválnování nejmenší tyče kvadrát 14 mm z nápichu kvadrát 45 mm, respektive z kulatiny 50 mm. V případě čtvrté sady válců jde o válce hladké, které mají průměr 350 mm. Tyto hladké válce, nebo oblina válců kalibrovaných se využívá



pro válcování výchozího polotovaru o čtvercovém průřezu s tím, že délka strany polotovaru může být až 84 mm [33-35].

Na **obr. 19** vlevo (a) lze vidět komplet předválcovací stolice s teplotním skenerem a elektrickými nůžkami v pozadí. Vpravo (b) lze vidět vpustky, které jsou umístěny na vstupní straně vratné stolice při válcování kruhové tyče za tepla [33-35]. Při realizaci experimentu v této práci byly pro ohřev použity mobilní elektrické odporové pece různých konstrukcí (s maximální teplotou 1200 °C).



**Obr. 19** Předválcovací stolice (a) + vpustky na vstupní straně (b) [34,35]

## 6.2 Příprava materiálu

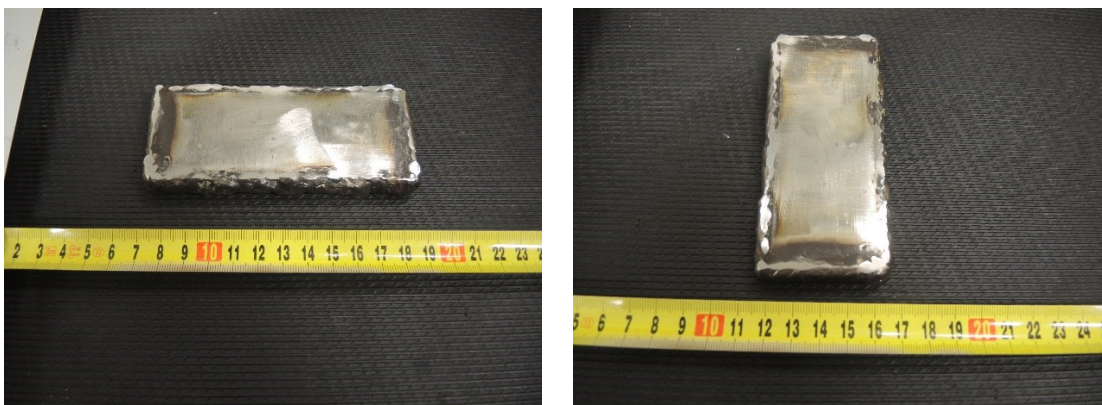
Experiment byl realizován s cílem spojit dvě typově i chemickým složením zásadně odlišné oceli a tím dosáhnout kombinace a kompromisu v jejich užitných vlastnostech. Konkrétně se jedná o nástrojovou ocel AISI D2 (DIN 1.2379) a austenitickou antikorozi ocel AISI 304 (DIN 1.4301) a jejich chemické složení je popsáno v **tabulce 3** [32]. V kapitole 3.3 jsou oceli detailněji popsány také po technologické stránce. Z těchto ocelí byly připraveny pakety (sendviče), což jsou vzorky s několika vrstvami různých nebo střídajících se ocelí.

**Tabulka 3** Chemické složení použitých ocelí [32]

Druh oceli	Obsah prvků v hmotnostních %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S
AISI D2	1,460	0,258	0,239	11,2	0,197	0,769	0,711	-	-
AISI 304	0,08	1	2	18	8	-	-	0,04	0,03

Z obou uvedených ocelí byly použity plechy o tloušťce 3 mm, šířce 50 mm a byly děleny na délku 120 mm. Tyto plechy byly broušeny shora na pásové brusce se zrnitostí 120 z důvodu odstranění případné pasivní vrstvy na povrchu materiálu. Materiál byl odmaštěn a zbaven nečistot pomocí technického čističe a následně skládán na sebe s tím, že muselo být dodrženo střídání jednotlivých ocelí.

Jakmile jsou jednotlivé vrstvy naskládány na sobě je posledním krokem přípravy paketů celoobvodové svařování vrstev, aby byla při válcování zachována soudržnost materiálů v podélné i kolmé ose paketu. Svařování bylo provedeno metodou MMA. Jedná se o metodu ručního obloukového svařování, tedy ruční svařování elektrickým obloukem s tavícími se elektrodami. Jako elektroda byly použity obalené elektrody typu ESAB E 316L-17 (určené pro svařování nerezů či případně přechodové svařování) o průměru 2,5 mm. Tímto způsobem byly vyhotoveny pakety o 5 vrstvách. 15 vrstvé pakety byly svařeny ze tří proválcovaných 5 vrstevých a 45 vrstvé pakety pak ze 3 proválcovaných 15 vrstevých, přičemž, v každém případě byly stykové plochy obdobně připraveny jako v případě 5 vrstevých paketů. Na **obr. 20** je pak vyfocen již vyhotovený paket, konkrétně jde o paket pětivrstvý.

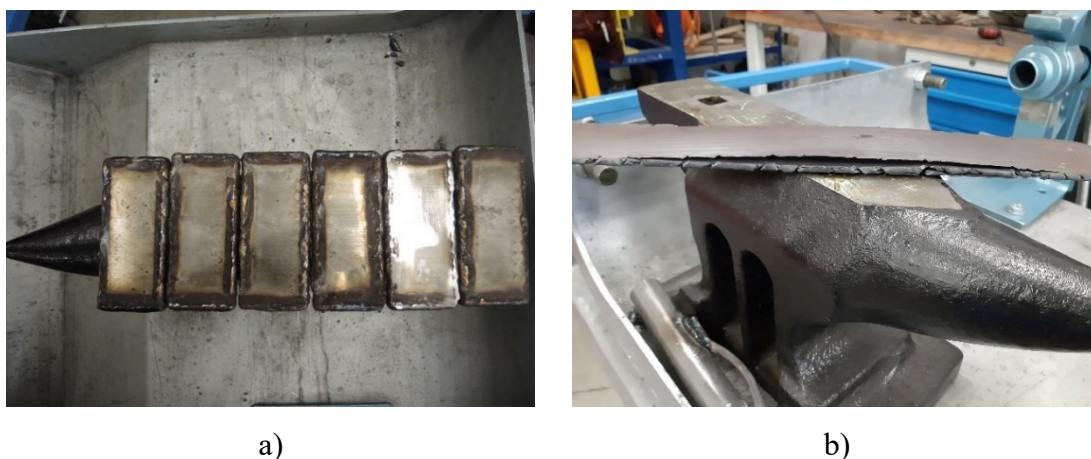


**Obr. 20** Pětivrstvý paket, připraven k válcování



### 6.3 Válcování

Po důkladné přípravě materiálu předcházející svařování, sestavení paketů a následném svaření vzorků následovalo válcování jednotlivých paketů. Jako první byly však válcovány zkušební vzorky, za účelem nalezení limit válcovací stolice, při válcování tohoto typu materiálu. Zkušební vzorky tedy byly podrobeny ohřevu na 900, 1000 a 1100 °C a deformace činily 30 % a 50 %. Při tomto typu testování nebylo ani v jednom z případů kombinací teplot a deformace překročeno limitního nastavení válcovací stolice. Nicméně byl zjištěn další důležitý a komplikující faktor, a sice ve všech případech nedošlo ke spojení všech vrstev. Na fotografii (**obr. 21**) je viditelné, že se jedna z vrstev zkušebního vzorku oddělila od ostatních, jinak řečeno, při válcování došlo k delaminaci vrstev. K tomuto jevu došlo pravděpodobně z důvodu špatného odstranění pasivní vrstvy při přípravě materiálu. Pasivní vrstva nástrojové oceli AISI D2, která byla obtížně odstranitelná ve fázi kompletace paketu, znemožňovala spojení materiálu.



**Obr. 21** Zkušební vzorky (a) a delaminovaný vzorek (b)

Z tohoto důvodu byly při přípravě dalších vzorků – paketů vstupní materiály broušeny vyšší intenzitou a s hrubší zrnitostí pásu (30) a bylo tedy také odebráno více materiálu. Další část experimentu již byla provedena na paketech, které po válcování nevykazovaly tento zásadní nedostatek. V další fázi byly tedy nejprve sestaveny 3 pětivrstvé pakety, s konečnou tloušťkou (výškou) 13,6 mm, což znamená že každý vstupní plech byl zbroušen na každé straně o přibližně 0,14 mm. Takto připravené a svařené pakety byly následně sedmi průchody válcovány na konečnou výšku 4,2 mm, přičemž teplota ohřevu byla vedena 1100 °C s výdrží v peci po dobu 20 minut. Konečná výška 4,2 mm byla vybrána jako jakýsi kompromis pro pokračování v experimentu a odběry vzorků pro různé analýzy. Dále po prvním, třetím a pátém

úběru následoval meziohřev opět na teplotu 1100 °C po dobu 5 minut. Jelikož v předchozím experimentu bylo ověřeno, že tato válcovací stolice při zvolených podmínkách ohřevu zkoumaného kompozitu dovoluje i první deformaci (poměrný výškový úběr) 50 %, tudíž s předpokladem dosažení kvalitního spoje bylo tohoto využito, nicméně vlivem skoku válců byla tato hodnota mírně menší 44 %, respektive 45 % pro 15 a 45 vrstvé pakety. Další velikosti deformací v následujících úběrech lze vyčíst z **tabulek 4-8** a to pro pakety o 5, 15 i 45 vrstvách, nicméně 3-7 úběr byl ve všech případech realizován při shodném nastavení válcovací mezery (4 mm) a deformace byla tak ovlivňována pouze skokem válců. V případě 15 vrstevných paketů, byly připraveny dva tyto pakety o tloušťce 12,6 mm, a to rozřezáním všech 5 vrstevných paketů na půlky (ze středové části byl ponechán malý odřezek pro metalografickou analýzu). Paket s 45 vrstvami byl připraven pouze jeden, přičemž opět byl použit předchozí postup, tedy 15 vrstvé pakety se nadělily na půlky se zachování středové části vzorku na následující metalografické analýzy. 45 vrstvý paket byl tedy složen ze tří povrchově obroušených odřezků z 15 vrstevných proválcovaných paketů a měl výšku 12,6 mm.

Do **tabulek 4-8** byly zaznamenány základní rozměry finálních vzorků před válcováním, po válcování a také hodnoty deformací, které vznikly v průběhu válcování mezi jednotlivým úběrem. Chtěl bych upozornit, že konečná výška všech vzorků po 7. úběru je (**tabulka 4**) 4,3 mm, kdežto v předcházejícím odstavci a také v kapitole měření vrstev (kapitola 6.5) se konečná výška pohybuje okolo 4,2 mm. K tomuto rozdílu došlo díky měření tloušťky po válcování za tepla, rozdíl 0,1 mm je tedy přisuzován tepelné dilataci vzorku. V kapitole 6.5 je naopak tento rozměr již měřen za pokojové teploty, na kterou byly vyválcované vzorky jednotně v peci zpomaleně ochlazovány. Na **obr. 22-24** jsou zaznamenány průběhy válcovacích momentů stolice, válcovací síly a nastavení válcovací mezery v závislosti na čase. Značení D5-D45 pak reprezentuje označení vzorku (D) a jeho počet vrstev (5, 15, 45).

**Tabulka 4** Rozměry před a po válcování

Vzorek	Rozměry před válcováním [mm]			Počet úběrů a tloušťka paketů po válcování [mm]						
	$h_0$	$l_0$	$b_0$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$	$h_7$
<b>D5</b>	13,6	120	50	7,60	6,00	5,05	4,60	4,45	4,40	4,30
<b>D15</b>	12,6	120	50	6,90	6,25	5,25	4,70	4,45	4,40	4,30
<b>D45</b>	12,6	120	50	6,90	6,25	5,25	4,70	4,45	4,40	4,30

**Tabulka 5** Absolutní deformace pro jednotlivé úběry

Vzorek	Absolutní deformace [mm]						
	$\Delta h_1$	$\Delta h_2$	$\Delta h_3$	$\Delta h_4$	$\Delta h_5$	$\Delta h_6$	$\Delta h_7$
<b>D5</b>	6,00	1,60	0,95	0,45	0,15	0,05	0,10
<b>D15</b>	5,70	0,65	1,00	0,55	0,25	0,05	0,10
<b>D45</b>	5,70	0,65	1,00	0,55	0,25	0,05	0,10

**Tabulka 6** Poměrná deformace pro jednotlivé úběry

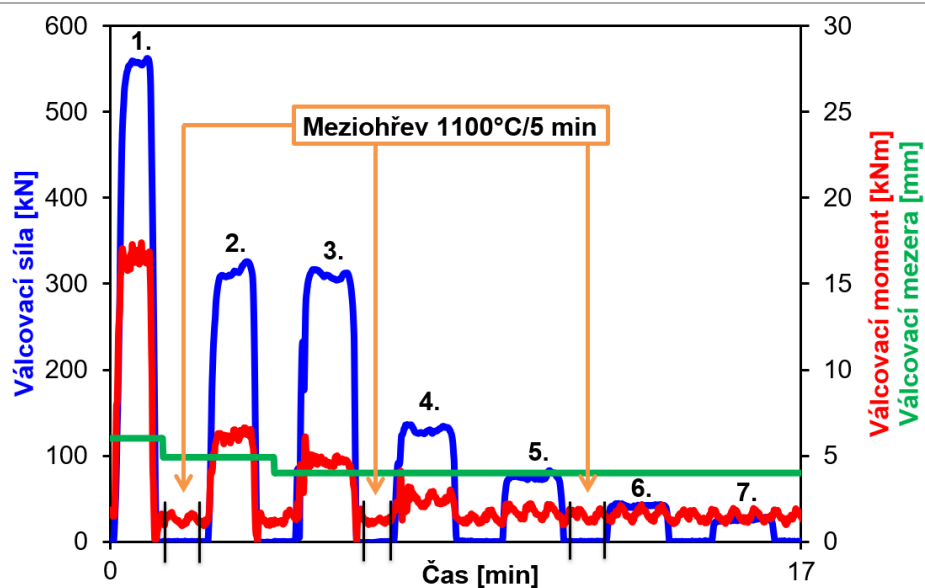
Vzorek	Poměrná deformace [%]						
	$\varepsilon_{h1}$	$\varepsilon_{h2}$	$\varepsilon_{h3}$	$\varepsilon_{h4}$	$\varepsilon_{h5}$	$\varepsilon_{h6}$	$\varepsilon_{h7}$
<b>D5</b>	44,118	21,053	15,833	8,911	3,261	1,124	2,273
<b>D15</b>	45,238	9,420	16,000	10,476	5,319	1,124	2,273
<b>D45</b>	45,238	9,420	16,000	10,476	5,319	1,124	2,273

**Tabulka 7** Skutečná (logaritmická) deformace pro jednotlivé úběry

Vzorek	Skutečná (logaritmická) deformace [-]						
	$\varepsilon_{h1}$	$\varepsilon_{h2}$	$\varepsilon_{h3}$	$\varepsilon_{h4}$	$\varepsilon_{h5}$	$\varepsilon_{h6}$	$\varepsilon_{h7}$
<b>D5</b>	-0,582	-0,236	-0,172	-0,093	-0,033	-0,011	-0,023
<b>D15</b>	-0,602	-0,099	-0,174	-0,111	-0,055	-0,011	-0,023
<b>D45</b>	-0,602	-0,099	-0,174	-0,111	-0,055	-0,011	-0,023

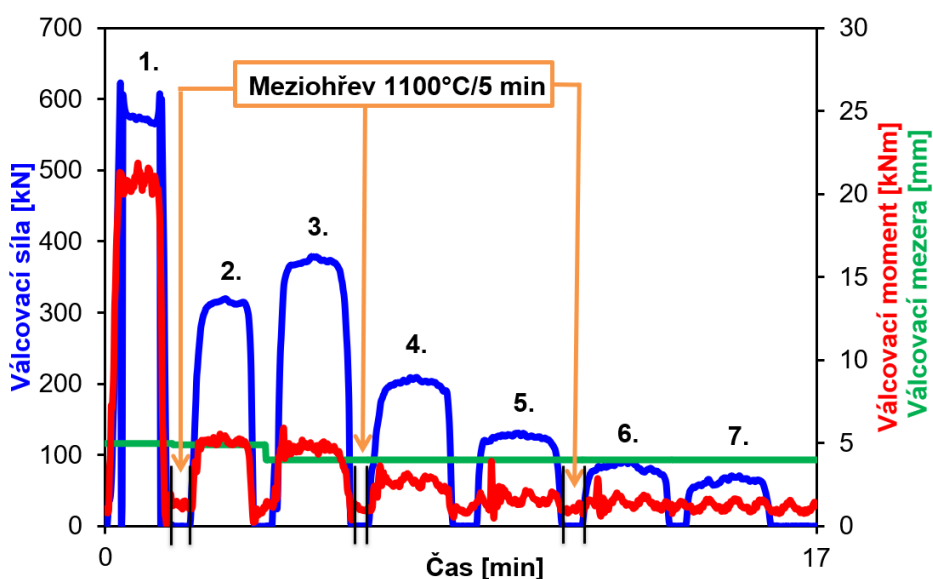
**Tabulka 8** Celkové deformace od 1. do 7. úběru

Vzorek	$\Delta h_{\text{celk.}} [\text{mm}]$	$\varepsilon_{h,\text{celk.}} [\%]$	$\varepsilon_{h,\text{celk.}} [-]$
<b>D5</b>	9,30	0,684	-1,151
<b>D15</b>	8,30	0,659	-1,075
<b>D45</b>	8,30	0,659	-1,075



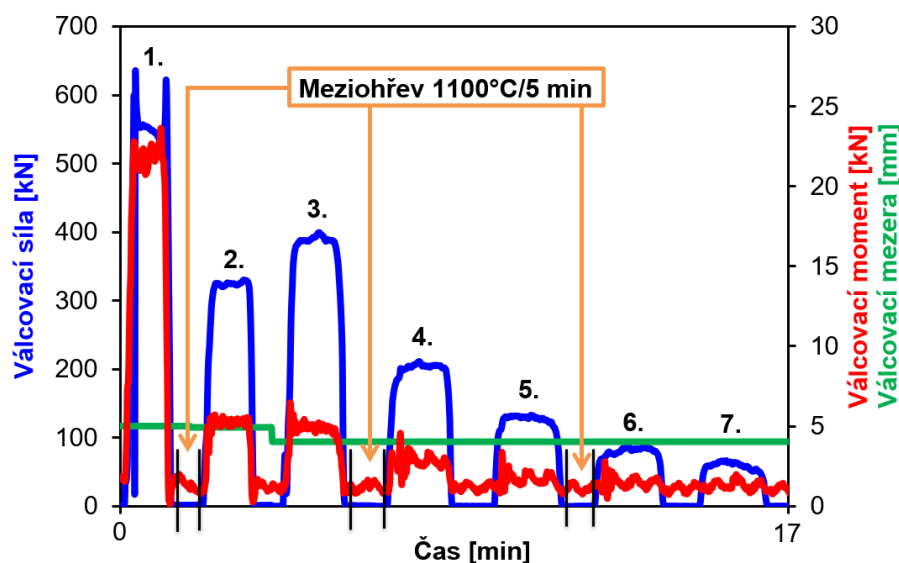
**Obr. 22** Graf válcovacích dat pro vzorek D5

Na **obr. 22** je vyznačena závislost válcovacích dat na čase pro vzorek D5. Vzorek D5 jevil při válcování ze všech tří vzorků nejmenší válcovací odpory při všech úběrech. Největší rozdíly válcovacích sil a válcovacích momentů stolice, mezi jednotlivými úběry, jsou až do 5. úběru, je to dáno především změnou válcovací mezery a také při těchto úběrech docházelo k největším deformacím. Největší válcovací síla potřebná při prvním úběru tohoto vzorku dosahuje hodnot cca 561 kN, přičemž samozřejmě v tomto úběru byl také naměřen největší válcovací moment stolice pro tenhle vzorek, konkrétně 17,4 kNm. Válcovací mezera je změněna mezi 1. a 2. úběrem z 6 mm na 4,9 mm. Mezi 2. a 3. úběrem pak z 4,9 mm na 4 mm a dále se nemění.



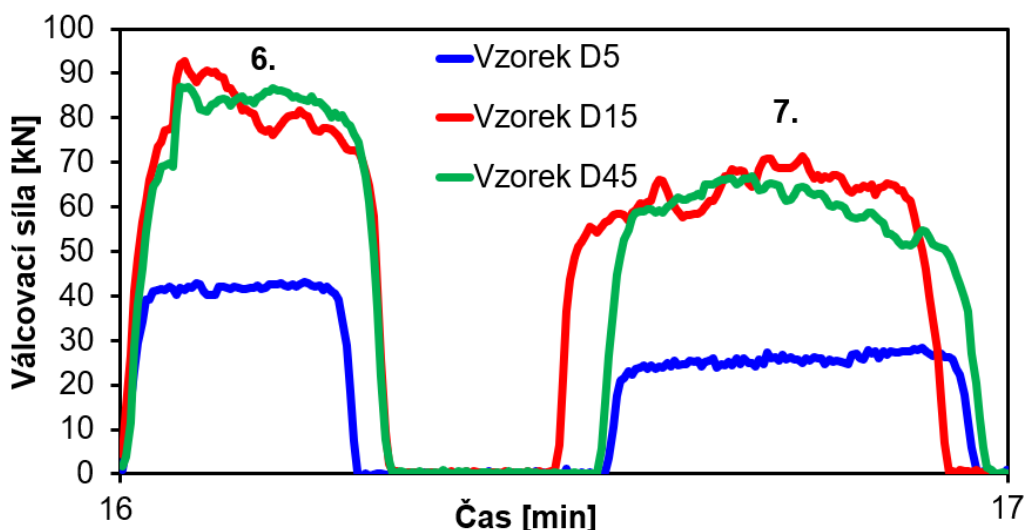
**Obr. 23** Graf válcovacích dat pro vzorek D15

Při válcování vzorku o 15 vrstvách (**obr. 23**) bylo hned patrné, že zvyšování počet vrstev ocelí v paketech má znatelný vliv na pevnostní vlastnosti. Plně porovnatelné to je sice až posledním grafu (**obr. 25**), kde jsou porovnány poslední úběry, ale předpokládat se to dá již v prvních úběrech, například vzhledem k tomu, že první úběr má silové maximum na hodnotě 619 kN. V případě válcovacího momentu se pohybujeme na maximu 21,85 kNm pro tento vzorek, což je o 4,45 kNm víc než v případě vzorku D5. Lze tedy potvrdit vyšší nároky na válcovací stolici a její hnací ústrojí.



**Obr. 24** Graf válcovacích dat pro vzorek D45

Z grafu na **obr. 24** pro vzorek D45 je zřejmé, že rozdíly nejsou mezi 45 a 15 vrstvami tak zásadní. Maximální válcovací síla při prvním úběru činí 632 kN, což je o 12 kN víc než v případě vzorku D15, avšak při porovnání posledních dvou úběrů se hodnoty opět lehce liší. Maximální moment stolice je v tomto případě 23,62 kNm, což je o 1,77 kNm větší hodnota než v případě vzorku D15.



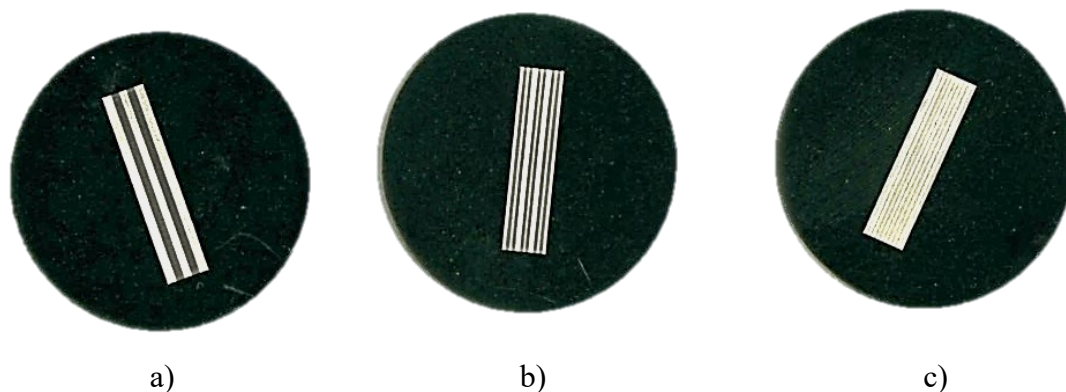
**Obr. 25** Srovnání válcovacích sil pro 6. a 7. úběr

Při srovnání válcovacích sil v posledních dvou úběrech u všech tří vzorků (**obr. 25**) lze konstatovat, že s rostoucím počtem vrstev nám také rostou pevnostní vlastnosti, avšak pouze v rozsahu počtu vrstev 5-15.

Jelikož se průběhy křivek pro vzorky D15 a D45 mění díky vnějším vlivům (jako je například přestup tepla ze vzorku do kleští při manipulaci) a dají se považovat za podobné, uvažujeme pouze rozdíly mezi D5 a D15. Vzorek D5 vykázal největší válcovací sílu v 5. úběru o hodnotě 42,65 kN, přičemž vzorek D15 vykázal hodnotu 92,64 kN, to znamená rozdíl téměř 50 kN ve prospěch vzorku D15. Od 15 vrstev a výš se již válcovací síly nemění, respektive se mění v neznatelných rozdílech. Při tomto složení našich kompozitních vzorků tedy nemá cenu zvyšovat počet vrstev, abychom dosáhli lepších pevnostních vlastností, podobně tomu je také u tvrdosti, kdy se tvrdost liší opět nejvíce mezi vzorkem D5 a D15, podrobněji je to popsáno v kapitole 6.6.

## 6.4 Metalografie

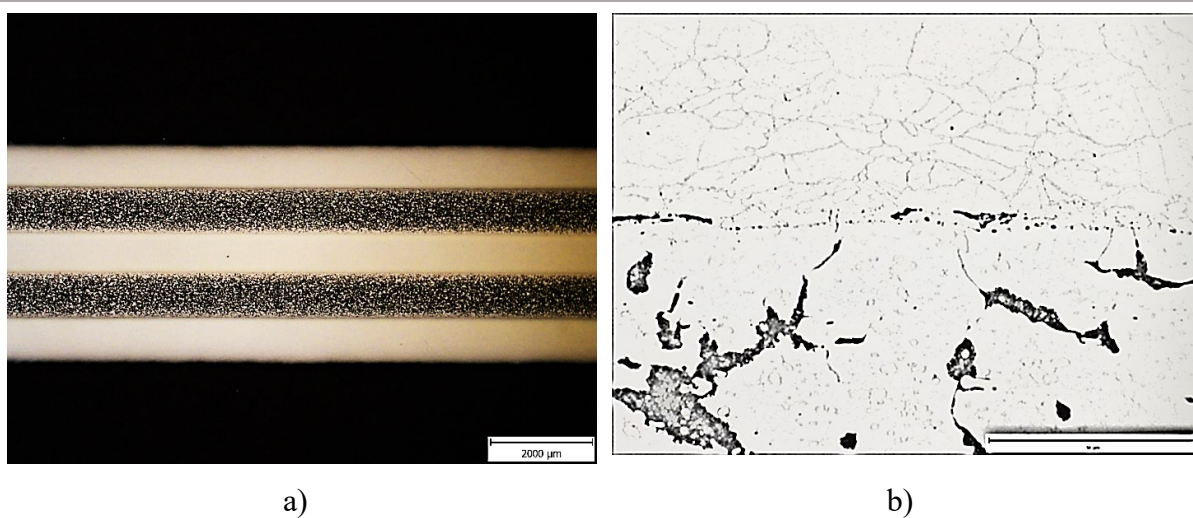
Součástí tohoto experimentu bylo také podrobení vzorků optickým metalografickým analýzám. Na třech vzorcích (D5, D15 a D45) byl proveden příčný řez, který je kolmý na podélné osy vzorků a metalografie byla provedena ve středu jejich šířky i délky. Jako první bylo provedeno fotodokumentování makrostruktury pomocí skeneru, jak lze vidět na **obr. 26**, a bylo realizováno na vzorcích, které byly zároveň podrobeny dokumentování mikrostruktury.



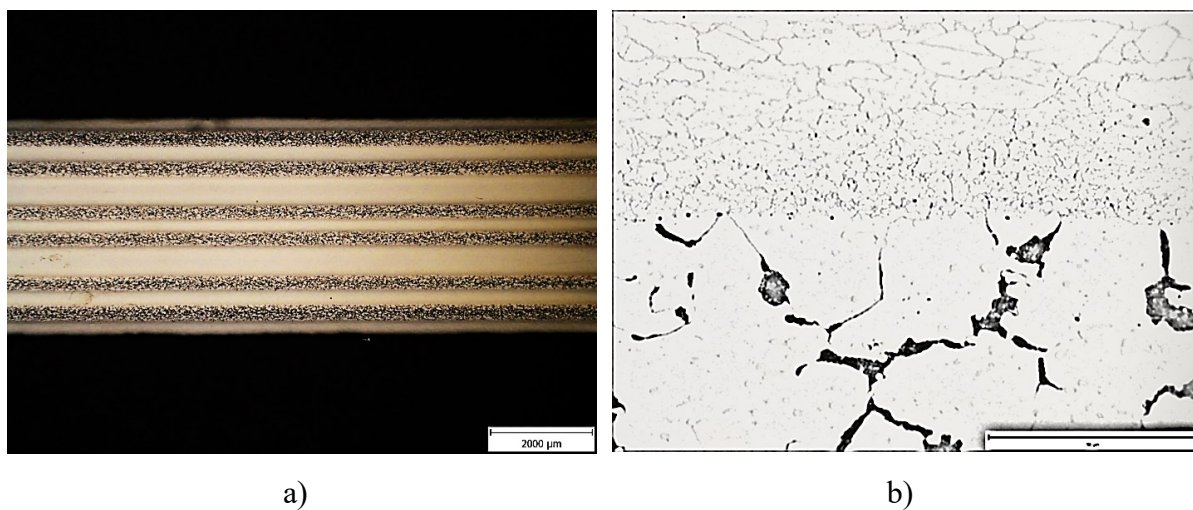
**Obr. 26** Makrosnímky testovaných vzorků a) D5, b) D15, c) D45

Vzorky byly pro zlepšení viditelnosti makrostruktury leptány chemickým leptacím roztokem L-1 na bázi chloridu železitého. Po naleptání již lze pozorovat dané vrstvy. U všech vzorků, nám světlé vrstvy reprezentují austenitickou korozivzdornou ocel AISI 304 a tmavé vrstvy nám reprezentují nástrojovou ocel AISI D2. Mikroskopické snímky, které dokumentují detaily spojů (**obr. 27-29**) byly minimálně graficky upraveny, pro zlepšení viditelnosti a rozlišitelnosti zrna. U všech metalografických snímků (jak u makro snímků, tak u mikro snímků) nebyly zaznamenány žádné defekty, nebo náznaky delaminace. Mikrostruktura vzorků byla fotodokumentována především s cílem zaměřit se na co největší detaily spojení a změny ve struktuře v této oblasti.

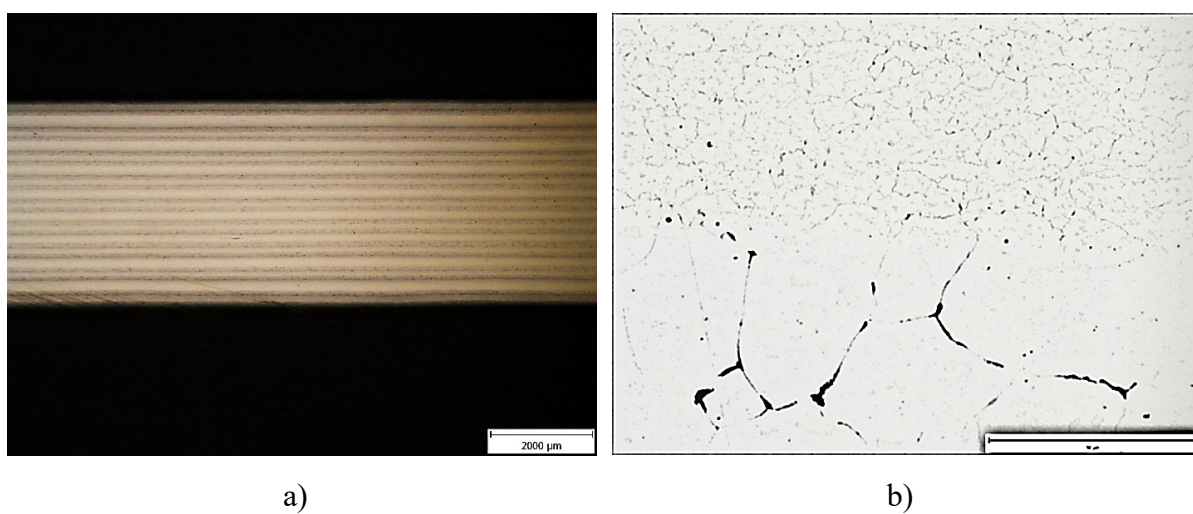




**Obr. 27** Metalografické snímky vzorku D5, a) zvětšení 12,5x, b) zvětšení 1000x



**Obr. 28** Metalografické snímky vzorku D15, a) zvětšení 12,5x, b) zvětšení 1000x

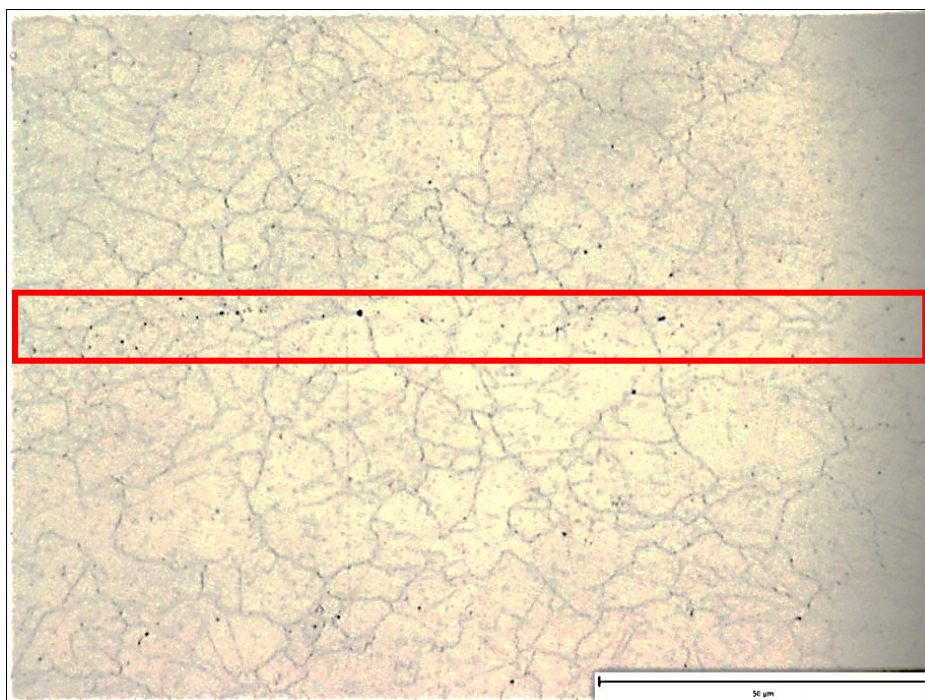


**Obr. 29** Metalografické snímky vzorku D45, a) zvětšení 12,5x, b) zvětšení 1000x



U vzorků s 5 a 15 vrstvami (**obr. 27 a 28**) byl spoj mezi vrstvami kompaktní i přes to, že se ve spoji vyskytovaly drobné řetízky oxidů železa. I přes tento jev lze považovat materiály za kompaktní a kvalita spoje je dobrá. Lze si také na snímcích povšimnout, že se nám s rostoucím počtem vrstev zjemňuje zrno (především v místě spoje vrstev) a také dochází k oduhličování nástrojové oceli AISI D2, zároveň samotný spoj je čistší s větším počtem vrstev. Oduhličování oceli AISI D2 je zřejmě důsledek opakovaného ohřívání oceli na teplotu 1100 °C, což je hraniční teplota tváření této oceli. Celkově má ocel AISI 304 jemnější zrno. Po vyválnování a následném řízeném dochlazování tedy bylo dosaženo lepších pevnostních vlastností, částečně i díky zjemnění zrna.

V případě vzorku D45 bylo dokumentováno i spojení dvou vrstev (oblast červeného ohrazení) ocelí AISI 304 (**obr. 30**), kde je spoj opět v některých místech lemován drobnými řetízky patrně oxidů železa a v dalších místech je spoj dokonale čistý s neznatelným přechodem mezi jednotlivými vrstvami.



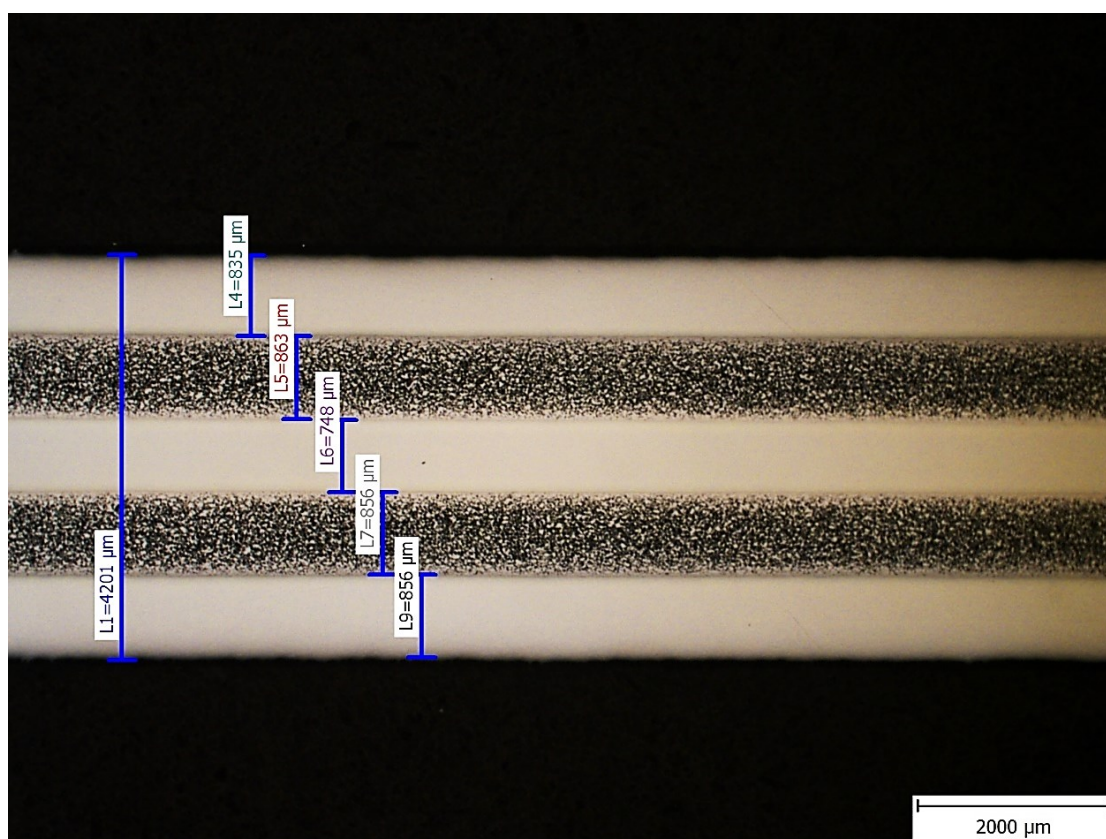
**Obr. 30** Detail spojení dvou vrstev oceli AISI 304, zvětšeno 1000x

## 6.5 Měření tloušťky vrstev

Po zhodnocení metalografických snímků následovalo měření tlouštěk jednotlivých vrstev u všech tří vzorků. Tloušťky byly naměřeny a zároveň fotodokumentovány (**obr. 31-33**) pomocí softwaru Quick PHOTO INDUSTRIAL 3.2 a hodnoty byly zaznamenány do **tabulky 9**.

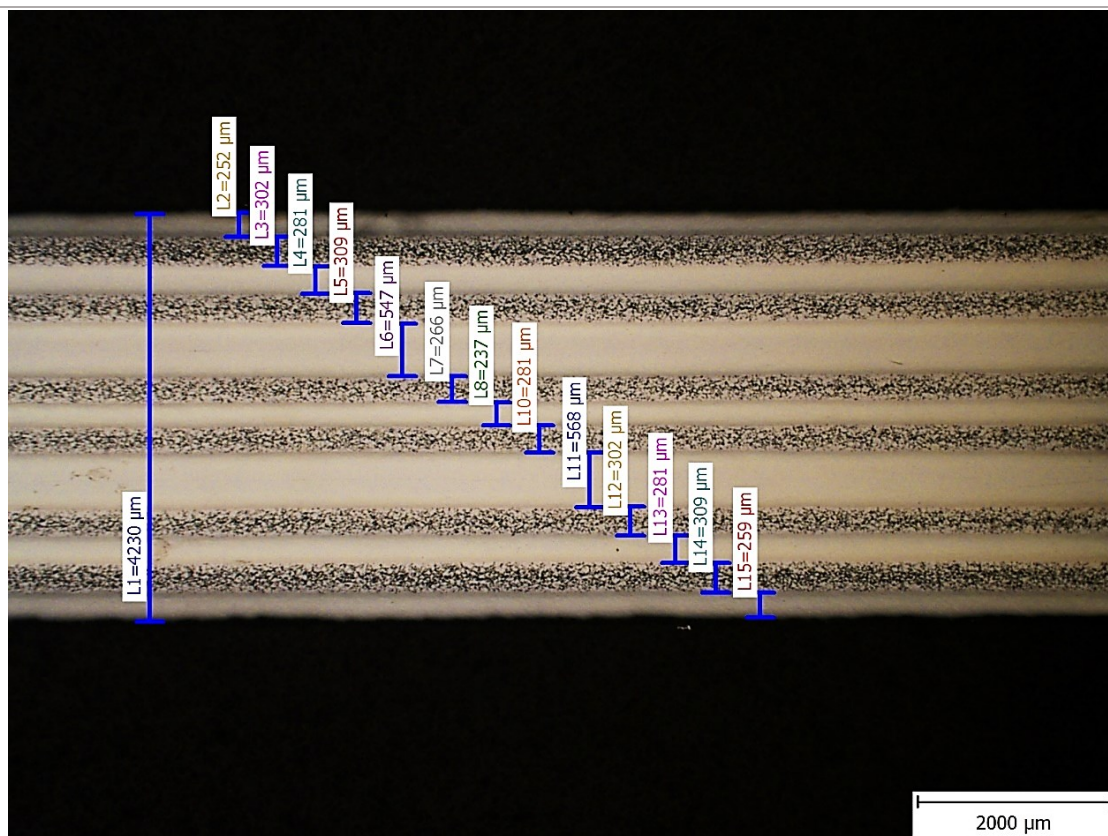
**Tabulka 9** Data z měření tloušťky vrstev

Vzorek	Průměrná tloušťka vrstev [ $\mu\text{m}$ ]	Celková tloušťka vzorku [ $\mu\text{m}$ ]	Směrodatná odchylka [ $\mu\text{m}$ ]
D5	831,60	4201	42,8
D15	279,63	4230	20,1
D45	92,78	4209	12,4

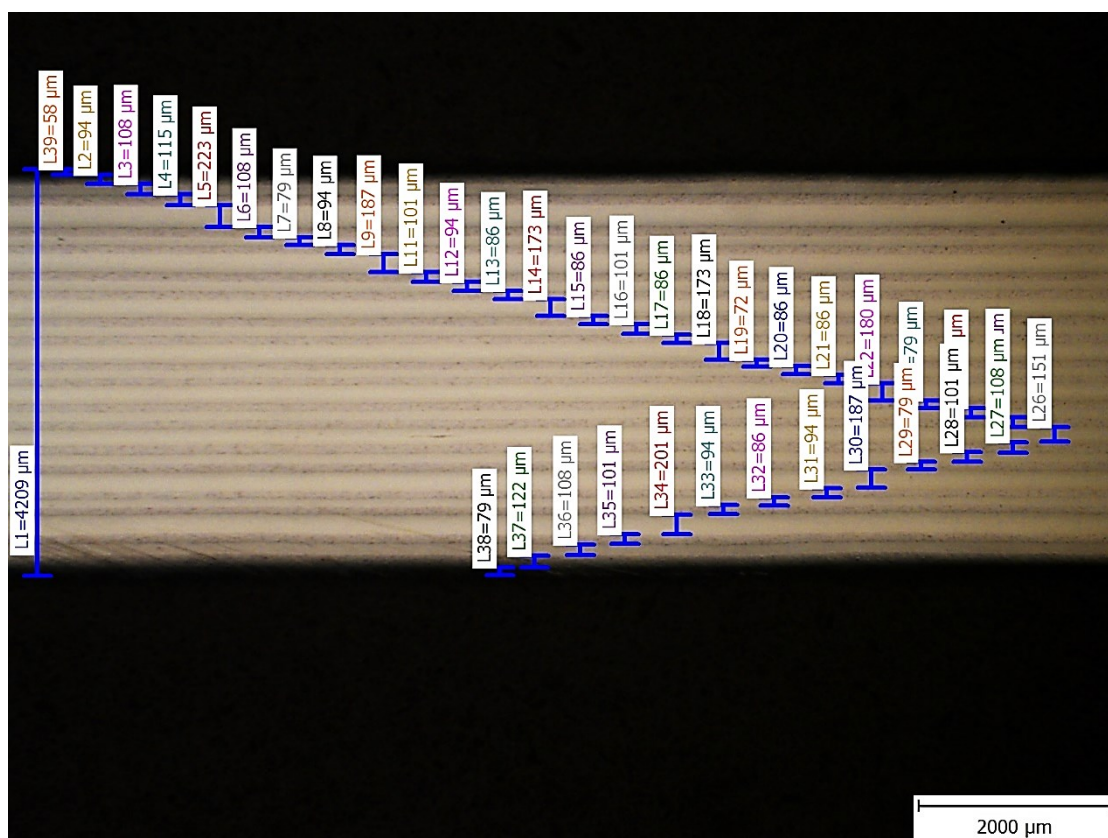


**Obr. 31** Tloušťky vrstev pro vzorek D5

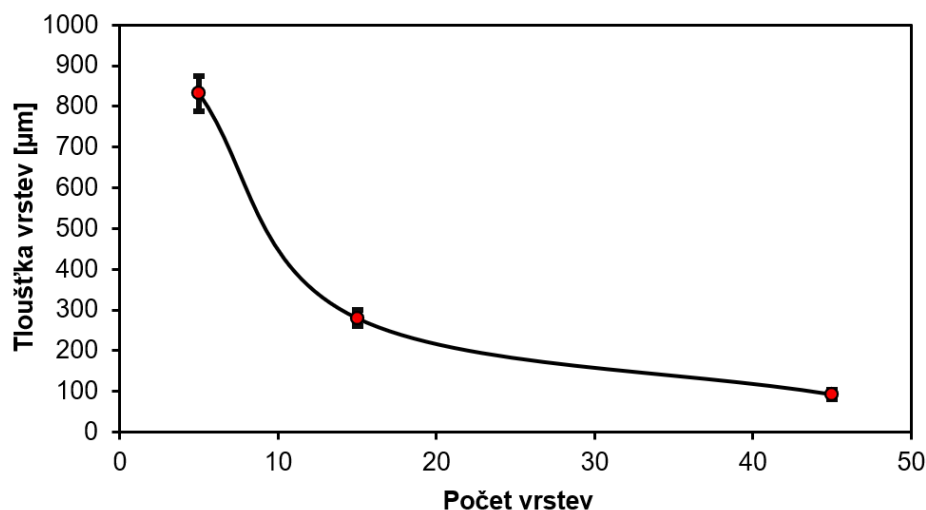




Obr. 32 Tloušťky vrstev pro vzorek D15



Obr. 33 Tloušťky vrstev pro vzorek D45



**Obr. 34** Graf závislosti průměrné tloušťky vrstev na počtu vrstev ve vzorku

Graf na **obr. 34** znázorňuje závislost mezi průměrnou tloušťkou vrstev a celkovým počtem vrstev ve vzorku. Vzorek D5 vykazoval průměrnou tloušťku všech vrstev 831,60 μm, vzorek D15 pak 279,63 μm, a nakonec vzorek D45 vykazoval 92,78 μm. U vzorků D15 a D45 musely být spojené vrstvy austenitické oceli AISI 304 poděleny dvěma. S klesající tloušťkou jednotlivých vrstev samozřejmě klesala i směrodatná odchylka.

Nicméně z toho měření tlouštěk jednotlivých vrstev je především zásadní, že vrstvy obou spojovaných ocelí měly stejnou tloušťku, a tedy se i stejně deformovaly. Tento pozitivní fakt byl s největší pravděpodobností zajištěn celoobvodovým svarem. V případě použití pouze bodových svarů, které se často aplikují u těchto postupů výroby svárkového damašku, by situace byla zřejmě jiná a méně pevná a více tvárnější korozivzdorná ocel by se zřejmě více prodlužovala, a tedy by měl i menší tloušťku vrstev.

## 6.6 Měření tvrdosti

Na vyválnovaných vzorcích o 5, 15 a 45 vrstvách byla měřena tvrdost povrchu podle Brinella (HBW tvrdost). Zkouška tvrdosti podle Brinella probíhá sjednocenou normou ČSN EN ISO 6506-1. Tato zkouška je založena na principu vnikání cizího (zkušebního) tělesa do vzorku, konkrétně jde o tvrdokovovou kuličku. V našem případě se jedná o kuličku ze slinutých karbidů, proto je zkouška označena HBW. Pokud by se jednalo o kuličku z kalené oceli, zkouška by byla označena HBS. U každého vzorku se prováděly 3 vpichy a dvakrát se měřil průměr vtisku (veškeré hodnoty jsou znázorněny v **tabulce 10**), z jehož průměrných hodnot, a předem stanovené rovnice (vztah 1, 2) pak vychází výsledná tvrdost HBW [36]. Graf na **obr. 35** níže nám pak ukazuje závislost tvrdosti jednotlivých vzorků na počtu vrstev, ze kterých jsou pakety sestaveny.

Hodnota výsledné tvrdosti HB se tedy vyjádří pomocí vztahu:

$$HB = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Kde: HB – značení tvrdosti dle Brinella

S – plocha vtisku kuličky [mm<sup>2</sup>]

F – síla vyvolaná vtlačováním kuličky [N]

Plocha S je pak získána pomocí vztahu:

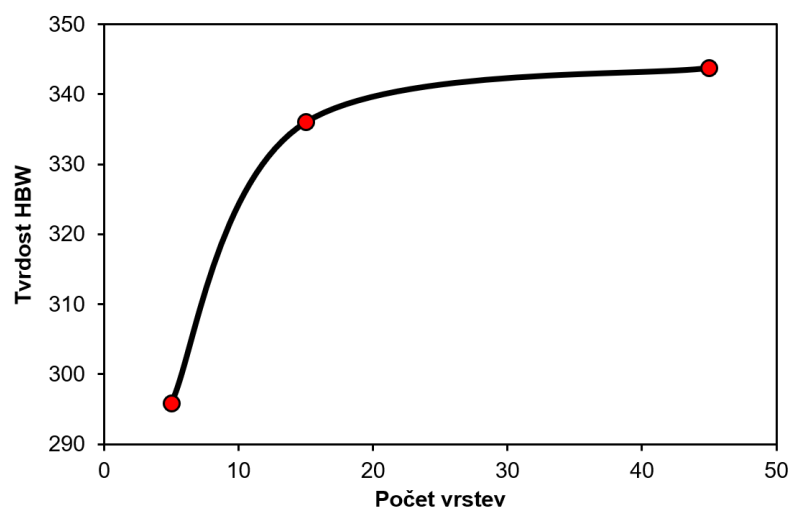
$$S = \pi \cdot D \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad (2)$$

Kde: D – průměr kuličky [mm]

d – průměr vtisku [mm]

**Tabulka 10** Naměřené hodnoty ze zkoušky tvrdosti

Vzorek	Vpich	Průměr vtisku [mm]				Tvrdost HBW
		d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>φ</sub>	d <sub>φ, vpich</sub>	
D5	1	0,957	0,966	0,962	0,884	296
	2	0,804	0,798	0,801		
	3	0,869	0,909	0,889		
D15	1	0,832	0,817	0,825	0,831	336
	2	0,829	0,831	0,830		
	3	0,836	0,841	0,839		
D45	1	0,820	0,834	0,827	0,822	344
	2	0,814	0,835	0,825		
	3	0,810	0,818	0,814		



**Obr. 35** Graf závislosti tvrdosti na počtu vrstev v paketech

V grafu si lze povšimnout, že s rostoucím počtem vrstev ocelí v paketu nám do určité míry razantně vzrůstá tvrdost povrchu vzorků. Vzorek o 5 vrstvách (D5, který je zároveň vzorkem, s nejméně vrstvami v tomto experimentu) má nejnižší hodnotu, která začíná na 296 HBW. Je to způsobeno hlavně tím, že průměrná velikost vpichu kuličky při prvním měření tvrdosti je měřena zvlášť pro vrstvu oceli AISI 304, při druhém měření zvlášť pro vrstvu oceli AISI D2 a při třetím měření kulička vnikala mezi obě vrstvy. Bylo nutné vpichy měřit tímto způsobem, protože v případě vzorku D5 byly tloušťky vrstev větší než samotná normovaná kulička Brinellovy zkoušky, respektive její část, která vnikla do materiálu. Následující vzorek D15 má hodnotu tvrdosti HBW daleko vyšší, konkrétně tedy 336 HBW, jelikož počet vrstev vzorku už byl dostatečný pro změření vpichu na obou vrstvách. Z grafu jasně plyne, že rozdíl v tvrdosti mezi 5 vrstevým a 15 vrstevým paketem je daleko vyšší (ve prospěch 15 vrstvého), než mezi paketem o 45 vrstvách a 15 vrstvách. Je tedy možné, že výroba této kompozitní oceli, které přesahují počet vrstev 45 a výš, je neúčinná a z hlediska tvrdosti povrchu ztrácí smysl používat více vrstev, při tomto konkrétním složení kompozitu. Je zapotřebí dodat, že ve všech třech případech nebyl zkušební vzorek, či materiál, z kterého byl odebrán, jakkoliv tepelně zpracováván.

V **tabulce 11** níže pak lze pozorovat, že příprava kompozitního ocelového materiálu daného složení nese znatelné zlepšení tvrdosti povrchu materiálu. Avšak, jak již bylo zmíněno výše, ideální hranice mezi poměrem dosažené tvrdosti a počtu vrstev v materiálu se pohybuje okolo 45 vrstev, kdy se tento konkrétní kompozitní materiál blíží své maximální tvrdosti. Při daném postupu přípravy a složení bylo dosaženo maximální tvrdosti 344 HBW u kompozitní oceli, pro porovnání je pak udávána maximální tvrdost povrchu pro ocel AISI 304, což činí 201 HBW a pro nástrojovou ocel AISI D2 se tato hodnota pohybuje okolo 255 HBW [36]. Lze tedy konstatovat, že příprava tohoto kompozitu měla smysl v rámci zlepšení tvrdosti povrchu, avšak je zbytečné překračovat hranici složení 45 vrstev, protože za touto hranicí se již nárůst tvrdosti blíží svému maximu.

**Tabulka 11** Srovnání maximální dosažitelné tvrdosti pro dané materiály [36]

<b>Materiál</b>	<b>Maximální dosažitelná tvrdost HBW</b>
Kompozitní ocel, AISI 304 + AISI D2 (vzorek D45)	344
Nástrojová ocel AISI D2	255
Antikorozní ocel AISI 304	201



---

## 7 Závěr

V této závěrečné práci byla teoreticky i prakticky stručně popsána problematika přípravy vícevrstvých ocelových kompozitních materiálů. Byly splněny hlavní cíle práce, konkrétně návrh a optimalizace postupu přípravy vícevrstvé oceli na vratné duo stolici, která je součástí laboratorní polospojité válcovací tratě na Fakultě Materiálově-Technologické na VŠB-TU Ostrava.

U všech tří vzorků se výsledek přípravy dá považovat za úspěšný, jelikož bylo dosaženo dostatečně kvalitních spojů mezi vrstvami a tato kompozitní ocel vykazovala lepší mechanické vlastnosti, respektive tvrdost, než samotné vstupní oceli, ze kterých se skládala. Byly zdokumentovány metalografické snímky a měřeny tloušťky vrstev, které dokazují, že spoje mezi vrstvami byly kompaktní, došlo také k mírnému zjemnění zrna, což opět potvrzuje zlepšení mechanických vlastností. Těmto úspěšným výsledkům však předcházelo množství neúspěšných pokusů přípravy tohoto materiálu, které byly zejména způsobeny problémy s odstraňováním pasivní vrstvy u plechů z nástrojové oceli AISI D2. Při konkrétním složení připravovaného materiálu bylo také dokázáno, že v případě tvrdosti povrchu se již nevyplatí nucenému navyšování vrstev, protože od počtu vrstev 45 a výš již nedochází k žádnému výraznému zlepšení tvrdosti povrchu a jsou pouze zbytečně kladeny vyšší nároky na válcovací zařízení, což má dopad například na ekonomiku provozu válcovací tratě a náročnost samotného výrobního postupu.

Výsledky z tohoto experimentu v podobě načerpaných zkušeností i v podobě získaných polotovarů mohou být přínosné a mohou posloužit k dalším experimentům a dalšímu poznání v této problematice.

---

## Seznam použité literatury

- [1] HORÁK, M. *Damašková ocel* [online]. 18.4. 2004 [vid. 17.12. 2020] Dostupné z: <https://www.knife.cz/Knifecz/Technika/tabid/57/ctl/Details/mid/384/ItemID/50/Default.aspx>
- [2] VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [3] Obr. 1 *Vzor damaškové oceli typu Damasteel* [online] [vid. 23.12. 2020] Dostupné z: <https://damasteel.se/patterns/>
- [4] LÖBACH, G. *Damaszenerstahl Theorie und Praxis*. 1. vydání. Rosenheimer Straße 22, D-83043 Bad Aibling: Weiland Verlag GmbH, 2009. 173 str. ISBN 978-3-938711-31-6
- [5] Obr. 4 *Paket připravený na kovářské svařování* [online] [vid. 23.12. 2020] Dostupné z: <http://guineahogforge.blogspot.com/2016/08/damascus-jewelry-for-nc-state-fair.html>
- [6] *Povídání o damaškové a vrstvené oceli – část. I* [online] [vid. 14.03.2021] Dostupné z: <http://www.noze-nuz.com/recenze/damasek1/damasek1.php>
- [7] *Vliv legujících prvků* [online] [vid. 16.03. 2021] Dostupné z: [https://www.fabory.com/cs/knowledge\\_center/technical/steel/influence\\_of\\_alloying\\_elements](https://www.fabory.com/cs/knowledge_center/technical/steel/influence_of_alloying_elements)
- [8] *Technologie II, 1. Technologie tváření kovů*, Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní [online] [vid. 16.03. 2021] Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm)
- [9] *Vliv legovacích prvků na vlastnosti oceli* [online] [vid. 16.03. 2021] Dostupné z: <http://svanda.webz.cz/vyuka/legury.htm>
- [10] *Nástrojová ocel, Naše nabídka nástrojových ocelí, Materiálové listy* [online] [vid. 16.03.2021] Dostupné z: <http://toolsteel.cz/nastrojova-ocel/>
- [11] *SQUAL 5026 Steel (Mat.No. 1.5026, DIN 55Si7, SAE 9255)* [online] [vid. 16.03.2021] Dostupné z: <https://steelselector.sij.si/steels/55SI7.html>
- [12] *DIN EN 1.4301 Stainless Steel X5CrNi18-10 Material Equivalent, Properties, Chemical Composition*, The World Material [online] [vid. 16.03. 2021] Dostupné z: <https://www.theworldmaterial.com/din-en-1-4301-material-x5crni18-10-stainless-steel/>

- 
- [13] *DIN EN 1.2379 Steel X153CrMoV12 Material Equivalent, Datasheet, Properties*. World Material - Free Online Material Information Resource [online]. Copyright © 2021 [vid. 16.03.2021].  
Dostupné z: <https://www.theworldmaterial.com/din-en-1-2379-steel-x153crmov12-material/>
- [14] *Ložisková ocel 100Cr6 1.3505 - technické informace* [online] [vid.16.03. 2021]  
Dostupné z: <https://www.thesteel.com/cz/jakostni-uslechtila-ocel/loziskova-ocel-100cr6-1-3505>
- [15] *Prodej konstrukční oceli S235JR, 1.0038 a 1.0037* [online] [vid. 16.03.2021] Dostupné z: <https://www.thesteel.com/cz/jakostni-uslechtila-ocel/konstrukcni-ocel/s235jr>
- [16] *BLADE STEEL 1.5634 (AISI L6) 75Ni8* [online] [vid.16.03.2021]  
Dostupné z: <https://www.tomtek.eu/product/blade-steel-1-5634-aisi-l6-75ni8/>
- [17] SKOTNICOVÁ, K., KURSA, M. *Prášková metalurgie*. 1. vydání 2013 VŠB Technická univerzita Ostrava, 153 str., ISBN 978-80-248-3378-1
- [18] Obr. 8 *Schéma jednostranného lisování ocelového prášku* [online] [vid. 29.01. 2021]  
Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/Metalurgie.htm>
- [19] *Process of making Damasteel, Knowledge & Inspiration* [online]. [vid. 29.01. 2021]  
Dostupné z: <https://damasteel.se/process/>
- [20] *Co je to wootz?, Tavba Wootzu* [online]. [vid. 29.01. 2021]  
Dostupné z: <https://www.bemetal.cz/tutorials-navody>
- [21] *Timascus<sup>TM</sup> Information* [online] [vid. 30.01. 2021]  
Dostupné z: <https://www.alphaknifesupply.com/zdata-timascus.htm>
- [22] Obr. 11 *Polotovary pro výrobu nožů z Timasku* [online] [vid. 30.01. 2021]  
Dostupné z: <https://www.alphaknifesupply.com/shop/timascus-for-sale>
- [23] Obr. 12 *Prsteny Mokume Gane* [online] [vid. 30.01. 2021]  
Dostupné z: <https://www.inveniece.cz/i/snubni-prsteny/mokume-gane#it150>
- [24] *Co je Mokume Gane?* [online] [vid. 30.01 2021]  
Dostupné z: <https://www.okoshop.cz/technologie/3-mokume-gane>
- [25] *Kennis: Damaststaal; Uiteenzetting* [online] [vid. 5.02. 2021] Dostupné z: <https://www.smedentotaal.nl/kennisbank/kunstsiersmeden/damaststaal/damaststaal-uiteenzetting/>
-

- 
- [26] WADSWORTH, J., D. R., LESUER. *Ancient and modern laminated composites – From the Great Pyramid of Gizeh to Y2K*. International Metallographic Society 1999 Conference. Kalifornie, 14.3. 2000
- [27] LAU, J. *Low-Strain Warm Pressing of Multilayer Composites Yields Layers with Longer-Range Protection from Crack Deflection*. MRS Bulletin 2001. 26, 89
- [28] ČUMPELÍK, J. *Spalovací motory V, mazání motoru*, Autoexpert 2005, roč. 10, č. 11, s. 29-30
- [29] LESUER, D. R., C. K., SYN, O. D., SHERBY, J., WADSWORTH, J. J., LEWANDOWSKI a W. H., HUNT. *Mechanical behaviour of laminated metal composites*. International Materials Reviews. 1996, 41(5), 169-197, ISSN 09506608.
- [30] RADCHENKO, A.K., GOGAEVA, T.K. *Multilayer Steel Composite Prepared by Rolling*. Powder Metallurgy and Metal Ceramics 42, 336-340, 2003
- [31] KUBINA, T., NACHÁZEL, J. *Mechanické vlastnosti laminárních kompozitních ocelových materiálů připravených válcováním za tepla*. Kovářenství, č. 54, Zář 2015, Svaz Kováren ČR z. s., ISSN 1213-9289
- [32] ABDUL, R., MOHAMMED, N., M. Z., OMAR, S., AL-ZUBAIDI, K. S., ALHAWARI a M. A., ABDELGNEI. *Weldability and Joining Characteristics of AISI D2/AISI 304 Steels Using Semisolid Diffusion Joining*. Solid State Phenomena 2019, 285, 115-120 ISSN 1662-9779.
- [33] Interní zdroj 1, *Popis válcovací tratě*, VŠB-TU Ostrava, FMT, Katedra tváření materiálu
- [34] Interní zdroj 2, *Brožura válcovací tratě*, VŠB-TU Ostrava, FMT, Katedra tváření materiálu
- [35] *Polospojité válcovna tyčí* [online] [vid. 16.03.2021]  
Dostupné z: <https://www.fmt.vsb.cz/633/cs/veda-a-vyzkum/polospojita-valcovna-tyci/>
- [36] *World Material - Free Online Material Information Resource* [online]. Copyright © 2021 [cit. 27.04.2021]. Dostupné z: <https://www.theworldmaterial.com/>
-